



**Universidade de  
Aveiro  
2008**

Departamento de Engenharia Mecânica

**Francisco José Dias  
Oliveira**

**Desempenho de filmes de diamante no desgaste  
de matrizes de corte em WC-Co**





**Universidade de  
Aveiro  
2008**

Departamento de Engenharia Mecânica

**Francisco José Dias  
Oliveira**

**Desempenho de filmes de diamante no desgaste de  
matrizes de corte em WC-Co**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Gil Cabral, Professor Assistente convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Prof. Doutor José Grácio, Professor catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



Dedico este trabalho a algumas das pessoas mais importantes para mim, os meus pais, a minha irmã e o meu cunhado, a minha namorada Sara e, especialmente, aos meus sobrinhos Fabiana e Samuel...

*"Be the best you can be."  
(Anna Hemmings,  
Campeã do mundo de Maratonas)*



## **O júri**

Presidente Prof. Doutor Francisco Malheiro Queirós de Melo  
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Doutor Jorge Manuel da Conceição Rodrigues  
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico

Prof. Doutor Eduardo Gil dos Santos Cabral  
Professor Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José Joaquim Almeida Grácio  
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro





## **Agradecimentos**

Este passo importante da minha formação nunca teria sido possível sem a colaboração e o apoio insaciável de todas as pessoas que me rodeiam. A eles o meu obrigado.

Os meus pais, que tiveram um papel fundamental em toda a minha formação pessoal e profissional, por todo o encorajamento e paciência que sempre dispensaram e que foram decisivos na concretização deste trabalho.

À minha namorada, Sara Marto, pelo apoio, constantes incentivos e encorajamentos.

Duas pessoas que representaram um papel imprescindível e incansável, os orientadores e amigos Doutor Eduardo Gil Cabral e Doutor José Joaquim Almeida Grácio. Esta tese também é deles, aos quais agradeço todo o apoio e incentivo prestado.

Aos amigos José Santos, Vítor Alves e Vítor Neto por toda a ajuda, todas as discussões saudáveis que nos permitiram debater todas as nossas ideias consolidando assim o nosso conhecimento.

Quero deixar também um grande agradecimento ao Dr. Rolando Andrade, peça fundamental, por toda a ajuda na melhoria das condições psicológicas para que todo o trabalho fosse realizado com sucesso.

À INDASA – Industria de abrasivos S.A., principalmente na pessoa de Sr. Diamantino Branco por terem fornecido todo o metal duro, terem efectuado os testes necessários e me terem transmitido muito conhecimento por eles adquirido com a experiência profissional.

A todos aqueles, que não mencionados nesta lista mas que não são menos importantes e contribuíram para levar este trabalho a bom porto.

A todos eles os meu agradecimentos.



**palavras-chave** Filamento quente, diamante, CVD, abrasivos, Ferramentas de corte, Matrizes

## **Resumo**

O presente trabalho consistiu fundamentalmente na optimização de ferramentas de corte e de desgaste para telas abrasivas. Para o efeito desenvolveu-se uma ferramenta de corte multi-furo que permitisse cortar e furar simultaneamente dois discos de tela abrasiva.

De modo a aumentar o tempo de vida das ferramentas de corte analisou-se em detalhe o desempenho de filmes de diamante em matrizes de corte em substrato de WC-Co. Face aos resultados obtidos relativos à adesão do filme de diamante ao substrato e à resistência ao desgaste foi possível produzir um filme em condições reais que permitiu a diminuição significativa do desgaste das matrizes triplicando o seu tempo de vida.



**Keywords** HFCVD, diamond, CVD, abrasives, cutting tools, matrices

## **Abstract**

The present work was fundamentally in the optimization tools for cutting and wear for abrasive sand paper. To this end it has developed a cutting tool that would allow multi-hole cut and drill two sand paper discs simultaneously.

In order to increase the life of tools is examined in detail the performance of films, dies in diamond cutting in substrate of WC-Co.

Given the results concerning the accession of the film of the diamond substrate and the resistance to wear was possible to produce a film in real conditions that led to the significant decrease the erosion of matrices tripling its lifetime.



## Índice

<i>Lista de Figuras</i> .....	<i>iii</i>
<i>Lista de Tabelas</i> .....	<i>v</i>
<i>Lista de Símbolos e Abreviações</i> .....	<i>vii</i>
<i>Introdução</i> .....	<i>ix</i>
<i>Capítulo I</i> .....	<i>1</i>
<i>1.1.Introdução</i> .....	<i>1</i>
<i>1.2. Metal duro</i> .....	<i>3</i>
<i>1.3.Revestimentos de ferramentas de corte com filmes de diamante</i> .....	<i>7</i>
1.3.1.Interface diamante – carboneto .....	<i>7</i>
1.3.2.Estado de tensão dos filmes de diamante .....	<i>8</i>
<i>1.4. Processo de crescimento de filmes de diamante por HFCVD</i> .....	<i>9</i>
<i>1.5.Desenvolvimento de uma ferramenta combinada</i> .....	<i>13</i>
1.5.1.Princípio de corte .....	<i>14</i>
<i>Capítulo II</i> .....	<i>17</i>
<i>2.1.Técnicas de caracterização</i> .....	<i>17</i>
2.1.1. SEM – Scanning Electron Microscopy .....	<i>17</i>
2.1.3.Espectroscopia Raman .....	<i>18</i>
2.1.4.Adesão do filme ao substrato .....	<i>20</i>
<i>2.2. Amostras utilizadas – Propriedades</i> .....	<i>20</i>
<i>2.3. Preparação de amostras e pré-tratamentos</i> .....	<i>21</i>
2.3.1.Tratamento químico .....	<i>21</i>
2.3.2.Tratamento térmico .....	<i>23</i>
2.3.3.Seeding.....	<i>24</i>
<i>2.4.Condições de deposição</i> .....	<i>27</i>
<i>Capítulo III</i> .....	<i>30</i>
<i>3.1. Caracterização dos filmes de diamante</i> .....	<i>30</i>
<i>3.2.Teste de adesão</i> .....	<i>33</i>
<i>3.3.Testes de desempenho</i> .....	<i>35</i>
3.3.1 Testes mecânicos .....	<i>35</i>
3.3.1.1. Qualidade do corte .....	<i>37</i>
3.3.2. Teste mecânico em contínuo .....	<i>38</i>
<i>Capítulo IV</i> .....	<i>41</i>

<b>4.1. Desenvolvimento de uma ferramenta combinada.....</b>	<b>41</b>
<b>4.2. Dimensionamento.....</b>	<b>42</b>
4.2.1.1. Determinação da tensão de ruptura da lixa.....	42
4.2.1.2. Força de corte por punção.....	43
4.2.1.3. Força de corte da lâmina .....	44
4.2.1.4. Forças de extracção.....	45
4.2.1.5. Molas .....	46
4.2.1.6. Força total.....	46
4.2.1.7. Guiamento da ferramenta .....	46
<b>4.3. Projecto mecânico .....</b>	<b>47</b>
4.3.1. Matriz.....	47
4.3.1.1. Folga .....	48
<b>4.4. Montagem da matriz e almofada de corte .....</b>	<b>49</b>
<b>4.5. Placa porta punções .....</b>	<b>49</b>
<b>4.6. Punções.....</b>	<b>50</b>
4.6.1. Dimensionamento à encurvadura dos punções .....	51
4.6.2. Aperto.....	52
<b>4.7. Imagens da ferramenta após construção .....</b>	<b>57</b>
<b>Capítulo V.....</b>	<b>59</b>
<b>5.1. Conclusões gerais .....</b>	<b>59</b>
<b>5.2. Trabalhos futuros .....</b>	<b>59</b>
<b>Referências e Bibliográfica.....</b>	<b>61</b>



## Lista de Figuras

Figura 1 – Diferentes tipologias de lixas .....	2
Figura 2 – Matrizes de corte utilizadas no corte de lixas .....	2
Figura 3 – Pannel a): Relação entre a dureza e a granulometria de WC-Co para vários tipos de grão em função do teor de cobalto.....	4
Figura 4 – Coeficiente de expansão térmica do carboneto de tungsténio e do diamante. ....	9
Figura 5 – Influência da temperatura do filamento e da pressão do gás na produção de hidrogénio atómico .....	12
Figura 6 – Reactor HFCVD utilizado.....	13
Figura 7 – Configuração aproximada da lixa a obter . ....	14
Figura 8 – Representação esquemática das forças de corte .....	15
Figura 9 – Princípio de funcionamento do microscópio SEM . ....	18
Figura 10 – Tratamento químico a) <i>Murakami</i> durante 7’30’’; b) <i>Murakami</i> durante 7’30’’ e solução de ácido nítrico durante 15’’ .....	22
Figura 11 – Tratamento térmico; A) 1h, B) 2h, C) 3h.....	24
Figura 12 – Seeding e nucleação de acordo com a tabela 6; pannel a) amostra A1, pannel b) amostra A2, pannel c) amostra A3, pannel d) amostra A4 .....	26
Figura 13 – Análise de SEM – Serie 1 .....	31
Figura 14 – Análise <i>Raman</i> – Serie 1 .....	31
Figura 15 – Análise de SEM – Serie 4 .....	31
Figura 16 – Análise <i>Raman</i> – Serie 4 .....	31
Figura 17 – Análise de SEM – Serie 6 .....	31
Figura 18 – Análise <i>Raman</i> – Serie 6 .....	31
Figura 19 – EDS Localizado – Serie 3 .....	32
Figura 20 – Análise do espectro de RAMAN Proporção de diamante.....	33
Figura 21 – Análise do espectro de RAMAN Pureza do diamante .....	33
Figura 22 – Análise do espectro de RAMAN Tensão do filme.....	33
Figura 23 – Imagem das várias identações efectuadas; pannel a) série 1, 30kgf; pannel b) série 1 50kgf; pannel c) série 4 30kgf; pannel d) serie 4 50kgf; pannel e) série 6 30kgf pannel f) série 6 50kgf;.....	34
Figura 24 – Imagem representativa da aresta de corte após testes; pannel a) Matriz revestida; pannel b) Matriz não revestida.....	36
Figura 25 – Desgaste das matrizes de corte.....	37

Figura 26 – Zona de corte na lixa; painel a) Corte com matriz não revestida; painel b) Corte com matriz revestida; .....	37
Figura 27 – Desgaste das matrizes de corte revestidas. ....	38
Figura 28 – Provetes ensaiados .....	42
Figura 29 – Configuração da lâmina .....	44
Figura 30 – lâmina e contra-lâmina.....	44
Figura 31 – Sistema de extracção.....	45
Figura 32 – Montagem do sistema de extracção .....	45
Figura 33 – Casquilho guia .....	47
Figura 34 – Coluna guia .....	47
Figura 35 – Matriz.....	47
Figura 36 – Montagem do sistema de corte .....	49
Figura 37 – Porta punções .....	50
Figura 38 – Punção.....	50
Figura 39 – Esboço do punção e da respectiva cabeça antes e depois da montagem .....	52
Figura 40 – Diagramas de forças na cabeça e no punção respectivamente.....	53
Figura 41 – Distribuição de forças no punção durante o corte.....	55
Figura 42 – Ferramenta após construção.....	58

## ***Lista de Tabelas***

Tabela 1 – Propriedades físicas do metal duro em função do tamanho de grão.....	5
Tabela 2 – Técnicas de caracterização de filmes de diamante. ....	17
Tabela 3 – Características do espectro de <i>Raman</i> para diferentes bandas .....	19
Tabela 4 – Tratamento químico das amostras. ....	22
Tabela 5 – Tratamentos térmicos efectuados .....	23
Tabela 6 – Resumo das condições de <i>seeding</i> e de nucleação .....	26
Tabela 7 – Resumo das condições de deposição. ....	28
Tabela 8 – Limitações físicas da ferramenta .....	41
Tabela 9 – Dados do ensaio.....	43
Tabela 10 – Dados do ensaio de tracção.....	43
Tabela 11 – Resumos das forças a aplicar.....	46
Tabela 12 – Resumo das dimensões nominais dos punções e respectivas cabeças.....	57



## ***Lista de Símbolos e Abreviações***

HP-HT – High Pressure – High Temperature

CVD – Chemical Vapour Deposition

PACVD – Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition

RFCVD – Radio Frequency Chemical Vapour Deposition

LACVD – Laser Chemical Vapour Deposition

DLC – Diamond Like Carbon

CH<sub>4</sub> – Metano

CH<sub>3</sub>\* – Radicais de Metilo

H<sub>2</sub> – Hidrogénio

H\* – Hidrogénio Atómico

T<sub>fil.</sub> – Temperatura do filamento

sp<sup>3</sup> – Estrutura do diamante

sp<sup>2</sup> – Estrutura do grafite

G – Taxa de crescimento do diamante

Ta – Tântalo

W – Tungsténio

Re – Rénio

PCD – Diamante policristalino

PCBN – nitreto de boro cúbico policristalino

c-BN – Nitreto de boro cúbico

SEM – Scanning electron microscopy

FWHW – Largura a meia altura



## ***Introdução***

Matsumoto e colaboradores <sup>[1]</sup>, demonstraram na década de 80 ser possível depositar diamante a baixas pressões e baixas temperaturas, o que gerou um enorme interesse em investigar a técnica de deposição química na fase de vapor, CVD. Essa técnica evoluiu ao longo dos tempos, e actualmente, através do controlo das variáveis do processo, é possível depositar diamante em diversos materiais, com diversas geometrias, garantido a qualidade do revestimento.

Assim compreende-se o uso deste tipo de revestimento nas áreas da micro-electrónica e biomedecina, nomeadamente em prótese ortopédicas <sup>[2], [3]</sup>.

Todavia, a grande aplicação do CVD continua concentrada na indústria de produção de ferramentas de corte e desgaste. A indústria de abrasivos é um exemplo do uso de ferramentas de desgaste rápido. Assim, o revestimento poderá ser bastante vantajoso na melhoria da performance e do tempo de vida das ferramentas normalmente usadas. Sabe-se, que em muitos casos, revestir as ferramentas de corte com filmes de diamante é uma solução economicamente viável, pelo que é de todo o interesse estudar o comportamento de ferramentas WC-Co revestidas com filmes de diamante no corte de telas abrasivas.

O objectivo deste trabalho consiste no estudo do comportamento de filmes de diamante em matrizes de WC-Co em operações de elevado desgaste e simultaneamente no desenvolvimento de uma ferramenta com solução integrada de corte que permita cortar e furar tela abrasiva.

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, sendo a revisão bibliográfica o primeiro deles.

No segundo capítulo, estão descritas as técnicas de caracterização utilizadas (SEM, XPS e espectroscopia RAMAN). Neste capítulo pode encontrar-se ainda o procedimento experimental com particular incidência no tratamento de superfícies, seeding e condições de crescimento.

Os resultados experimentais, bem como a caracterização dos filmes estão descritos no terceiro capítulo.

O projecto detalhado da ferramenta de corte está discutido no capítulo quatro.

No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões gerais do estudo e sugeridas algumas linhas de orientação para trabalhos futuros.

Aveiro 2008

A handwritten signature in dark ink, slanted upwards to the right. The signature appears to read 'F. Oliveira' with a stylized flourish at the end.

Francisco J. Oliveira



## **Capítulo I**

*Neste primeiro capítulo, é apresentada uma pesquisa bibliográfica sobre o estado da arte relativamente aos revestimentos com filmes de diamante em substrato de WC-Co.*

*É dada particular atenção às lixas abrasivas, ao metal duro e aos filmes de diamante, passando pelos métodos de deposição nomeadamente o HFCVD.*

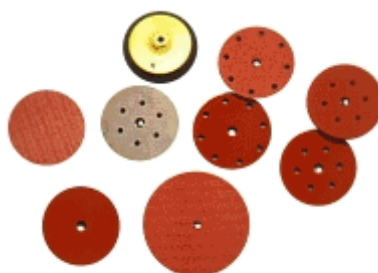
*São também identificados alguns desafios a partir dos quais este trabalho teve o seu início.*

### **1.1.Introdução**

Desde os tempos da pré-história, que o Homem tem necessidade de melhorar as suas ferramentas, armas e utensílios de trabalho de forma a aumentar a eficiência das mesmas. Nesta época, o abrasivo utilizado era a pedra natural <sup>[4]</sup>. Ao longo dos anos, o Homem foi aumentando o seu nível de exigência, passando a produzir ferramentas mais complexas e, conseqüentemente, melhores sistemas de abrasão, sendo que o desenvolvimento de abrasivos acompanhou sempre o desenvolvimento industrial.

Esta indústria continua em franca expansão, num mercado cada vez mais exigente e competitivo. As empresas produtoras de abrasivos estão em constante inovação e desenvolvimento na procura de novas tipologias da tela abrasiva para diferentes tipos de aplicações. Em virtude deste desenvolvimento surge a necessidade de projectar, desenvolver e optimizar as ferramentas para melhorar a sua produção.

É comum encontrar no mercado lixas abrasivas para as aplicações mais diversas, com diferentes tipos de grão e de formas geométricas. Na Figura 1, estão apresentadas alguns tipos de lixas que podem ser encontradas no mercado.



**Figura 1 – Diferentes tipologias de lixas** <sup>[5]</sup>

Um dos problemas na produção destas lixas prende-se com os respectivos cortes, pois nesta operação o desgaste das ferramentas de corte é bastante elevado, comprometendo assim a durabilidade das mesmas.

Para permitir uma fácil manutenção das ferramentas, estas são projectadas e desenvolvidas recorrendo a matrizes de corte e pastilhas facilmente amovíveis. Estes componentes são normalmente de metal duro ou de um aço temperado como por exemplo o aço C265.

Na Figura 2, são apresentadas matrizes de corte que permitem abrir furos cilíndricos em lixas.



**Figura 2 – Matrizes de corte utilizadas no corte de lixas**

Todavia, verificou-se que as ferramentas em metal duro, pelas suas propriedades, revelaram uma performance substancialmente superior para este tipo de aplicação quando comparadas com ferramentas construídas em aço temperado <sup>[6]</sup>.

Pretende-se com este trabalho estudar o comportamento de revestimentos de filmes de diamante no corte de tela abrasiva. Paralelamente pretende-se desenvolver uma ferramenta de corte e furação para obter lixas com geometrias complexas.

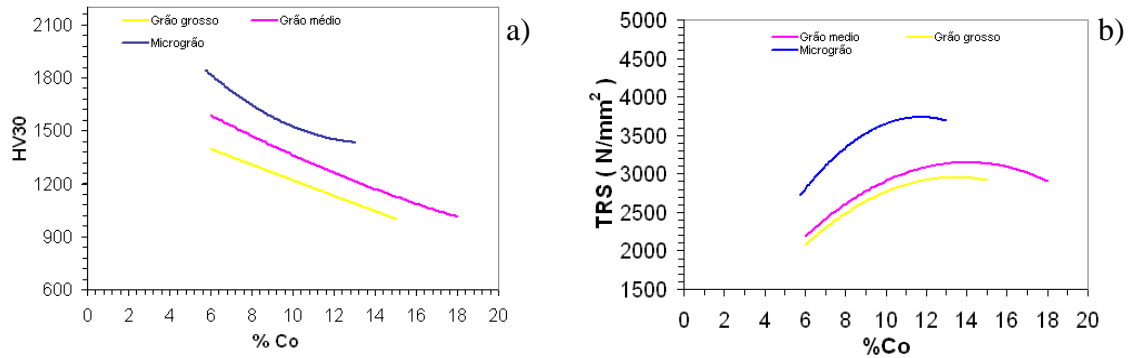
## **1.2. Metal duro**

Em 1923 por Karl Schroter surge a primeira patente sobre ligas de metal duro que dava conta do carboneto de tungstênio combinado com cobalto ou níquel numa percentagem de 4 a 10% <sup>[7]</sup>. Já 1927 F. Krupp lança o primeiro metal duro, com o nome de “Widia” (do wie Diamond, como diamante), que foi usado para matrizes de trefilagem e peças de desgaste. No entanto, nesta altura as ferramentas que eram produzidas não eram significativamente melhores que as ferramentas convencionais, em aço rápido, e só após a introdução do carboneto de titânio (TiC), e com o carboneto de tântalo (TaC) como aditivo ao carboneto de tungstênio e cobalto (WC-Co), se verificaram melhorias significativas no comportamento das ferramentas de corte, que se evidenciavam por uma grande resistência ao desgaste. <sup>[8]</sup>

Geralmente a inclusão ou o aumento do carboneto de tântalo e do carboneto de titânio no WC-Co reflecte-se num aumento da dureza a quente e elevada resistência à deformação térmica e numa diminuição da tensão de tracção <sup>[9]</sup>.

O metal duro com estes constituintes, tem as suas principais aplicações em operações de corte/desgaste que impliquem elevadas temperaturas. Operações de corte contínuo, limpeza de rebarba em tubos soldados longitudinalmente, maquinagem de urânio onde a adesão da apra à ferramenta é problemática. Operações onde a refrigeração é deficiente ou mesmo impossível, são algumas aplicações onde também é benéfico utilizar metal duro com estes constituintes <sup>[9] – [10]</sup>.

Contudo, o mais importante desenvolvimento para aumento da dureza nas ferramentas de carboneto de tungstênio foi o uso do micro-grão e de grão ultra-fino, sendo o grão de WC na ordem dos 0.5 – 0.8  $\mu\text{m}$  e de 0.2 – 0.5  $\mu\text{m}$  respectivamente e com percentagens de cobalto que variam entre 6 e 16% <sup>[10]</sup>. A produção deste material com alta qualidade só foi possível porque, paralelamente, foram desenvolvidos estudos e tecnologia para obter a matéria-prima com um tamanho de grão e, num estado de pureza tal, que preenche os critérios pretendidos na pulvometalurgia. A Figura 3 apresenta a dureza e a tensão de ruptura transversa para vários tamanhos de grão de metal duro em função da percentagem de cobalto <sup>[11]</sup>.



**Figura 3 – Painel a): Relação entre a dureza e a granulometria de WC-Co para vários tipos de grão em função do teor de cobalto.**

**Painel b): Tensão de ruptura transversa do WC-Co para os vários tipos de grão em função do teor de cobalto.** <sup>[11]</sup>

A dureza do metal duro é das propriedades mais importantes na aplicação em ferramentas de corte. Esta é influenciada directamente pela quantidade de cobalto e pelo tamanho do grão de carboneto de tungsténio. Da análise da Figura 3 a), facilmente se pode verificar que para o mesmo tamanho de grão, a dureza diminui com o aumento do teor de cobalto. Já para o mesmo teor de cobalto, a dureza diminui à medida que o tamanho do grão aumenta.

Já a tensão de ruptura transversa, Figura 3 b), aumenta com o aumento do teor de cobalto, e tal como a dureza, para o mesmo teor de cobalto a tensão de ruptura transversa diminui à medida que o grão aumenta.

A tabela 1 é representativa das propriedades de vários graus de metal duro para aplicações em operações de desgaste/corte.

Tabela 1 – Propriedades físicas do metal duro em função do tamanho de grão. [11] - [14]

Composição química %				Tamanho do grão	Densidade	Dureza Vickers	Tensão de ruptura transversal	Modulo de Young	Tenacidade a fractura	Coef. de expansão térmica
WC	TiC	TaC	Co	µm	[g/cm <sup>3</sup> ]	[HV]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>3/2</sup> ]	[10 <sup>-6</sup> /k]
94			6	1,7	14,90	1500	2200	7100	12	5,3
94			6	2,8	14,90	1430	2300	5900	14	5,3
90			10	>5	14,55	1000	3100	5700	21	5,8
80			20	2,8	13,60	910	2900	3800	22	6,9
74,8	12	5	8,2	1,7	11,70	1550	1800	4600	13	6,3
77	4	8	11	1,7	13,10	1390	2400	5200	15	6,4

No entanto, apesar do metal duro possuir excelentes propriedades para aplicações em ferramentas de corte, com o passar do tempo surgiu a necessidade de as melhorar e adaptá-las a funções mais específicas.

Esta necessidade deu origem ao desenvolvimento de vários revestimentos. Um deles e talvez o mais interessante, pelas suas propriedades são os revestimentos por filmes de diamante.

A primeira tentativa de sucesso para a obtenção de diamante sintético consistiu em tentar reproduzir o diamante da mesma forma que a natureza o fez, em elevadas pressões e elevadas temperaturas (HP-HT). Tal foi feito conseguido pela General Electric Company (GEC) em 1959. Nesta altura, foram usadas pressões entre 50 a 100 kbar e temperaturas entre 1800 e 2300 K. Este desenvolvimento foi a rampa de lançamento no uso do diamante numa escala industrial <sup>[16] – [17]</sup>.

No entanto, este processo pelo facto de consumir demasiada energia, mostrou ser um processo demasiado dispendioso, sendo necessário desenvolver novos processos de criação/deposição de diamante que fossem significativamente mais baratos. Com o avançar do tempo, foram surgindo cada vez mais processos e técnicas de deposição de filmes de carbono, processos esses que podem ser de índole física (PVD – Deposição física na fase de vapor) e química (CVD – Deposição química na fase de vapor), sendo os processos químicos claramente mais baratos que os processos físicos. Alguns dos processos químicos mais comuns são o CVD assistido por plasma (PACVD), CVD assistido por radiofrequência (RFCVD), CVD por filamento quente (HFCVD), CVD assistido por laser (LACVD), CVD assistido por descarga de arco (“Arc Discharge Jet”), CVD assistido por descarga de corrente contínua (“d. c. Discharge”).

Dos vários métodos, a deposição por filamento quente, HFCVD, é o mais utilizado no revestimento de superfícies com geometrias complexas.

O diamante possui propriedades de excelência a nível, mecânico, térmico, eléctrico entre outros. A nível mecânico destaca-se especialmente a elevada resistência ao desgaste e ao corte, e o baixo coeficiente de atrito e especialmente a sua dureza, pois o diamante ainda é o material mais duro conhecido até aos dias de hoje <sup>[15] – [16]</sup>. Termicamente, pela sua excelente condutibilidade térmica este é normalmente usado como dissipador de calor <sup>[16]</sup>.

Devido às suas propriedades, os filmes de diamante têm um vasto número de aplicações. É comum aplicar filmes de diamante em ferramentas de corte, componentes eléctricos e electrónicos, aplicações aeroespaciais, ópticas e biomédicas, estando já a ser comum o aparecimento de filmes de diamante em peças de decoração <sup>[18] – [20]</sup>.

### ***1.3.Revestimentos de ferramentas de corte com filmes de diamante***

As ferramentas de corte revestidas por CVD podem ser divididas em duas categorias: a) revestidas por filmes finos; b) insertos de filmes finos em diamante <sup>[21]</sup>.

As ferramentas revestidas por filmes finos são mais usadas dado que o processo permite efectuar o revestimento em superfícies com geometrias complexas e em grandes profundidades. A melhoria do revestimento nas superfícies complexas traduziu-se numa melhoria do corte de metais, ferramentas mais eficazes e com custos finais das peças maquinadas significativamente mais baixos <sup>[22]</sup>.

Contudo, a implementação desta tecnologia está fortemente dependente da adesão do filme ao substrato.

#### ***1.3.1.Interface diamante – carboneto***

No desenvolvimento de um revestimento para uma ferramenta de corte é necessário que exista uma boa interface entre o diamante e o carboneto de tungsténio. Se a adesão na interface não for suficientemente forte, o revestimento não vai suportar os esforços durante a operação de maquinagem e irá saltar, levando assim a uma imprevisível e inconsistente vida das ferramentas <sup>[23]</sup>.

O nível de adesão do filme ao substrato limita largamente o campo de aplicações da ferramenta nomeadamente na maquinagem de grafite e de compósitos de carbono e de algumas ligas de alumínio <sup>[22]</sup>.

Os filmes de diamante depositados por CVD em WC-Co geralmente têm uma baixa adesão e esse facto deve-se a varias razões tais como: a) incompatibilidade dos coeficientes de expansão térmica; b) interacção entre o carbono e o cobalto que está presente na superfície da ferramenta <sup>[24]</sup>;

No processo de deposição, a migração e dissolução de átomos de carbono em cobalto durante o período de nucleação induz numa formação e acumulação de grafite na interface [25]. A qualidade do diamante a obter e a adesão do filme são muito baixas [25] comparativamente com as deposições onde não existe formação de grafite. Assim sendo é importante que o primeiro passo na preparação das ferramentas de corte de WC-Co seja a remoção de cobalto da superfície. Dos vários estudos publicados para evitar e limitar a formação de grafite incluem o uso de  $H_2O_2$ :  $H_2SO_4$ :  $HNO_3$  entre outros agentes químicos [26] – [28].

A abordagem feita no âmbito desta tese envolve o tratamento químico e tratamento térmico no WC-Co, com tempos e atmosfera controlada.

### ***1.3.2.Estado de tensão dos filmes de diamante***

Outro facto importante a ter em conta são os estados de tensão dos filmes de diamante.

A maior parte dos revestimentos estão sujeitos a uma tensão residual. Esta tensão influencia nas propriedades mecânicas dos filmes, como resistência à fadiga e ruptura do filme e podendo em muitos casos ser responsável por falhas na interface – Perda de adesão [29]. O gradiente temperatura do substrato também é responsável pela acumulação de tensão dos filmes [29].

Para filmes depositados por HFCVD onde  $h \ll H$ , sendo  $h$  a espessura do filme e  $H$  a espessura do substrato, a tensão do filme pode ser calculada através das expansão térmicas dos materiais constituintes, sendo então [30]:

$$\Delta \varepsilon_{th} = \int_{T_2}^{T_0} (\alpha_s - \alpha_d) dT \quad (1)$$

$$\Delta \varepsilon_{th} = \Delta T (\alpha_s - \alpha_d) \quad (2)$$



Onde  $\Delta T$  é a variação de temperatura entre a temperatura ambiente  $T_0$  e a temperatura de deposição,  $T_2$  e  $\alpha_s$  e  $\alpha_d$  são os coeficientes de expansão térmica do substrato e do filme respectivamente. Da análise das equações anteriores ( 1) e ( 2) verifica-se que a tensão no filme é tanto maior quanto maior for a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura de deposição.

A Figura 4 mostra o coeficiente de expansão térmica do diamante e do carboneto de tungsténio.

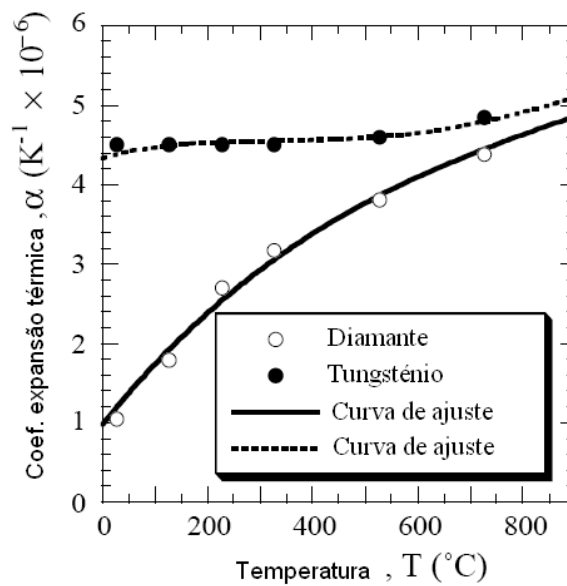


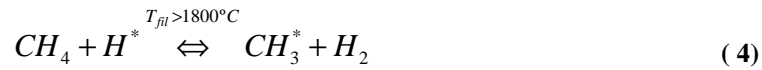
Figura 4 – Coeficiente de expansão térmica do carboneto de tungsténio e do diamante.<sup>[30]</sup>

Da figura anterior verifica-se que para elevadas temperaturas, o coeficiente de expansão térmica do diamante e do metal duro são muito próximos quando comparados estes dois materiais mas a temperaturas próximas da temperatura ambiente.

#### ***1.4. Processo de crescimento de filmes de diamante por HFCVD***

O processo HFCVD, que foi inicialmente desenvolvido por Matsumoto<sup>[31]</sup> e colaboradores na década de 50, é provavelmente a forma mais simples e reproduzível de crescer diamante a baixas pressões. Este processo foi o primeiro que permitiu obter uma nucleação contínua homogénea bem como o crescimento de diamante em diversos substratos.<sup>[32]</sup>

Para a produção de diamante no processo HFCVD, o gás entra no reactor numa mistura de 0.1 a 2%, em volume de metano ( $\text{CH}_4$ ) em hidrogénio ( $\text{H}_2$ ), a uma pressão de 10 a 100 torr. O hidrogénio ao passar entre os filamentos, que deverão estar a uma temperatura superior a  $1800^\circ\text{C}$ , dissocia-se formando hidrogénio atómico ( $\text{H}^*$ )<sup>[33]</sup> reagindo com o metano e formando radicais de metilo ( $\text{CH}_3^*$ ) segundo as seguintes equações químicas:



Das equações anteriormente referidas, resultam as espécies mais importantes no crescimento de filmes de diamante por filamento quente<sup>[34] – [37]</sup>. Para além da presença de  $\text{CH}_3^*$ , a presença de  $\text{H}^*$  é responsável por diversos mecanismos:

- a) A deposição de carbono ocorre simultaneamente em estrutura  $\text{sp}^3$  (estrutura do diamante), e em estrutura  $\text{sp}^2$ , estrutura da grafite. No entanto, foi demonstrado que durante o crescimento de diamante, a grafite é eliminada sob a acção do hidrogénio atómico ou a cinética da reacção química entre o  $\text{H}^*$  e a estrutura  $\text{sp}^2$  que é cerca de 500 vezes mais rápidas que a reacção entre o  $\text{H}^*$  e a estrutura  $\text{sp}^3$ <sup>[38]</sup>;
- b) O  $\text{H}^*$  pode recombinar-se na superfície do substrato, formando novamente  $\text{H}_2$ . A reacção exotérmica subadjacente conduz ao aquecimento do substrato durante a deposição de diamante<sup>[37] – [50]</sup>.

*Mankelevich*<sup>[52]</sup>, desenvolveu um modelo bidimensional que contempla a cinética de doze reacções químicas e de dez espécies distintas na deposição de filmes de diamante por HFCVD. O modelo tomou em consideração o mecanismo inerente à formação de  $\text{H}^*$  e à sua recombinação na superfície do substrato que foram testados em diferentes reactores HFCVD<sup>[51] – [66]</sup>. Os resultados obtidos permitiram observar o seguinte:

O modelo proposto por Mankelevich<sup>[52]</sup> para determinar a taxa de crescimento do diamante,  $G$  ( $\mu\text{m/h}$ ), considera como variáveis do processo a temperatura do gás na

vizinhança do substrato, a concentração de  $H^*$ , de  $H_2$  e de  $CH_3^*$  na vizinhança da superfície do substrato. A equação ( 5) indica que a taxa de crescimento aumenta com a concentração das espécies activas determinantes para a deposição de diamante, sendo também de extrema importância o controlo da temperatura no substrato.

$$G = \frac{c_1 \sqrt{T_{ns}} K_{eq} \left( \frac{n_{CH_4}^S}{n_{H_2}^S} \right) n_{CH_3}^S}{c_2 \exp\left(\frac{Q_1}{K_B T_S}\right) + c_3 \exp\left(\frac{Q_2}{K_B T_S}\right) + 1 + f(T_S) \frac{n_{H_2}^S}{n_{H^*}^S}} \quad (5)$$

$n_{CH_3}^S$  - Concentração de  $CH_3^*$  radicais de metilo na vizinhança da superfície do substrato

$n_{H_2}^S$  - Concentração de  $H_2$  na vizinhança da superfície do substrato

$n_{H^*}^S$  - Concentração  $H^*$  na vizinhança da superfície do substrato

$T_{ns}$  - Temperatura do gás na vizinhança da superfície do substrato

$T_S$  - Temperatura da superfície do substrato

$c_1 = 3.84 \times 10^{14}$ ;  $c_2 = 0.0089$ ;  $c_3 = 0.204$

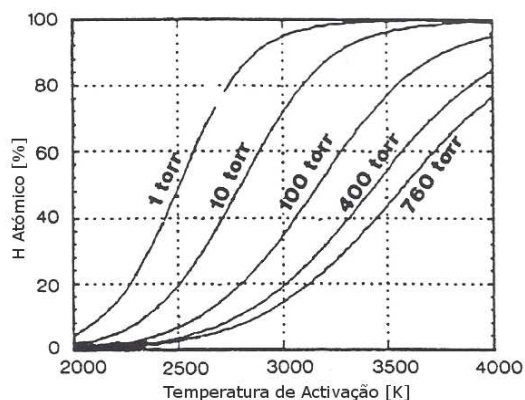
$R = 1.9873 \times 10^{-3} \text{ kcal (mol K)}^{-1}$

$Q_1 = 14.6 \text{ kcal mol}^{-1}$ ;

$Q_2 = 7.3 \text{ kcal mol}^{-1}$  (energia de activação do crescimento de diamante).

$$f(T_S) = 0.0021 e^{(-1.5/RT_S)} + 0.016 e^{(-5.2/RT_S)} + 0.1 e^{(-8.8/RT_S)} + 0.23 e^{(-12.5/RT_S)} \quad (6)$$

A formação do hidrogénio atómico é dependente da temperatura da superfície do filamento e da pressão do gás. Estudos realizados com base na termodinâmica do processo <sup>[67]</sup>, revelaram que a percentagem de  $H^*$  aumenta quando a temperatura do filamento é elevada e a pressão da mistura gasosa é baixa, conforme está indicado na Figura 5. A influência da pressão de gases na morfologia e qualidade de revestimentos de diamante foi estudada de forma mais detalhada por diversos grupos de investigação <sup>[68]–[72]</sup>.



**Figura 5 – Influência da temperatura do filamento e da pressão do gás na produção de hidrogénio atómico** <sup>[73]</sup>.

Sendo o aumento da temperatura do filamento a única forma viável para aumentar a eficiência de produção de  $H^*$ , é esperado que ocorra contaminação do filme de diamante com partículas do material do filamento. No sentido de minimizar ou eliminar este tipo de contaminação, o filamento deve ter um elevado ponto de fusão. De entre os diversos metais refractários possíveis de serem utilizados para fazer filamentos, o tântalo (Ta), o tungsténio (W) e o rénio (Re) são os mais usuais <sup>[33],[74]</sup>. No entanto, diferentes metais refractários implicam diferentes condições de  $CH_4$ , para obter a melhor taxa de crescimento do filme. Para o Ta e o Re, o aumento da temperatura do filamento até 2400 °C permite otimizar a taxa de crescimento para valores máximos. O tungsténio não é o mais indicado para aplicações a temperaturas tão elevadas, uma vez que sofre uma grande deformação durante a carburação.

Para efectuar as deposições foi usado o reactor HFCVD do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. A Figura 6 mostra uma imagem do reactor usado.



**Figura 6 – Reactor HFCVD utilizado**

### ***1.5.Desenvolvimento de uma ferramenta combinada***

A indústria abrasiva está num mercado cada vez mais exigente, e por conseguinte o desenvolvimento de novas lixas, com formas e geometrias cada vez mais complexas, tentando deste modo dar resposta às exigências do mercado.

O corte por arrombamento é um processo tecnológico bastante usado no corte de chapas, varões, barras, tubos, lixas entre outros.

Embora este tipo de corte seja efectuado em máquinas e ferramentas que geralmente exigem um elevado investimento, este processo revela-se bastante económico <sup>[75]</sup>.

Pretende-se desenvolver uma ferramenta piloto que permita cortar e furar tela abrasiva do género da representada na Figura 7. Esta ferramenta deve permitir o revestimento com

filmes de diamante a matriz e os respectivos punções uma vez que esta ferramenta terá cadências de trabalho elevadas e desgaste bastante acentuados.

Numa fase inicial, para efectuar os primeiros testes, a matriz da ferramenta será construída em aço e numa fase posterior evoluir-se-à para uma matriz em metal duro revestida com diamante, tal como os punções.

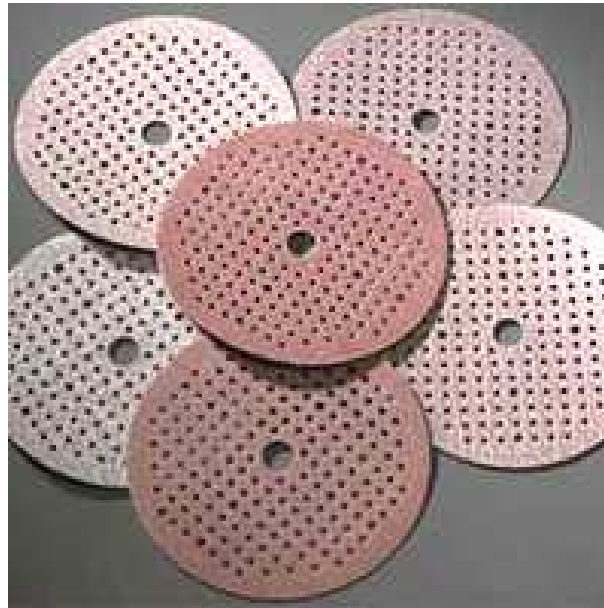
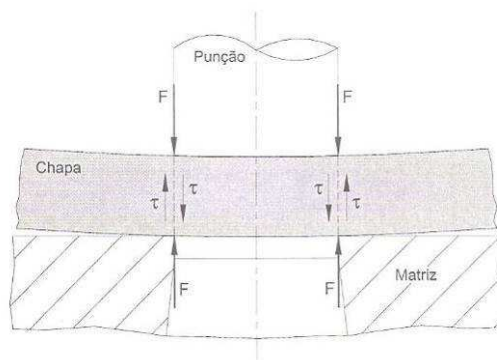


Figura 7 – Configuração aproximada da lixa a obter <sup>[76]</sup>.

### ***1.5.1.Princípio de corte***

Uma ferramenta típica de corte por arrombamento, na sua forma mais simples, é constituída por um punção e uma matriz.

A folga existente entre a matriz e o punção deve ser de uma ordem de grandeza bastante inferior às dimensões da matriz e do punção. Normalmente, esta folga deve variar 5 ~ 10% da espessura do material a cortar, sendo por isso comum admitir-se que o corte acontece devido a tensões de corte que se acumulam em toda a espessura da peça a cortar e em todo o perímetro de corte <sup>[77]</sup>, conforme representado na Figura 8.



**Figura 8 – Representação esquemática das forças de corte <sup>[77]</sup>**

Ao aplicar a força no punção, como representado, ocorre um arrastamento de material ao longo do punção para o interior da matriz. Este arrastamento tem início quando a tensão provocada pela força aplicada no punção ultrapassa a tensão limite elástico do material. Quando esta tensão ultrapassa o limite plástico ocorre a separação do material.

Na bibliografia não foram encontradas quaisquer referências ou estudos efectuados ao corte de tela abrasiva por corte mecânico. Assim recorreu-se principalmente ao conhecimento empírico das pessoas que lidam diariamente com este tipo e desafio. Para os respectivos dimensionamentos assumiu-se que a o corte de tela abrasiva se processa exactamente da mesma forma que o corte de chapa, mesmo sabendo que não é totalmente verdade. De acordo com o histórico de dados da INDASA – Indústria de abrasivos S.A. os valores de corte calculados estão bastante próximos dos valores medidos pelas máquinas durante a operação de corte.





## Capítulo II

*Neste capítulo é apresentado o procedimento experimental bem como as técnicas de caracterização utilizadas ao longo da tese. Foi dada especial atenção ao tratamento de superfícies, condições de deposição e taxas de crescimento dos filmes.*

### 2.1. Técnicas de caracterização

Existem inúmeras técnicas de caracterização de materiais. Porém, apenas algumas delas foram usadas neste trabalho e que se encontram descritas mais à frente <sup>[78] – [87]</sup>. Na tabela seguinte, pode ser encontrado um resumo das técnicas de caracterização de filmes de diamante.

**Tabela 2 – Técnicas de caracterização de filmes de diamante <sup>[78]</sup>.**

<i>Técnica</i>		<i>Processo físico</i>	<i>Tipo de informação</i>
Espectroscopia por vibração	Raman	Varrimento de luz por vibração com mudança de polaridade	Tipo de estrutura do carbono ( $sp^2/sp^3$ ), Estado de tensão, tamanho do grão, pureza do filme.
Microscopia electrónica	– SEM – Microscopia por varrimentos de electrões	Varrimento de electrões (5-30KeV) sobre uma superfície. Um sensor secundário detecta os electrões reflectidos mostra-os em forma de imagem.	Morfologia da superfície.

#### 2.1.1. SEM – Scanning Electron Microscopy

O SEM é uma técnica de análise de superfícies com um tamanho de grão (micro ou nano) que normalmente analisados ao microscópio óptico não se obtêm uma resolução suficiente. Na análise por SEM, um feixe de electrões (electrões primários) incide na superfície a analisar gerando uma desagregação de electrões (electrões secundários), electrões esses que são colhidos e mostrados no monitor em função da posição da amostra <sup>[78] – [80]</sup>.

O SEM apresenta inúmeras vantagens em relação aos microscópios ópticos comuns. A ampliação (de 50 a 40000x), a elevada resolução (de 2,5 a 10nm) e a possibilidade de obter imagens tridimensionais <sup>[78]</sup> são algumas das principais vantagens.

A Figura 9 mostra esquematicamente o princípio de funcionamento do SEM.

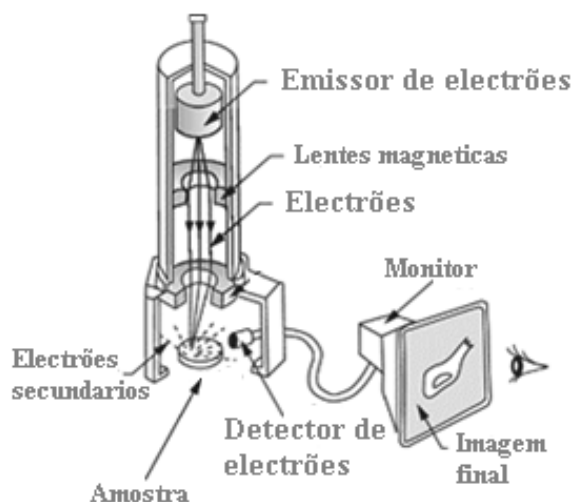


Figura 9 – Princípio de funcionamento do microscópio SEM <sup>[79]</sup>.

### 2.1.3. Espectroscopia Raman

A espectroscopia *Raman* tem sido extremamente importante na caracterização de filmes de diamante, principalmente dos filmes de CVD <sup>[80] – [84]</sup>. O princípio de funcionamento baseia-se num feixe de luz monocromático que é emitido em direcção à amostra provocando colisões entre os fotões e a superfície da amostra. Essas colisões podem ser elásticas ou inelásticas, sendo estas últimas que provocam as vibrações que são analisadas. A natureza destas vibrações é determinada pela simetria dos cristais sendo típica da natureza dos mesmos, e são definidas por faixas de frequências no espectro do *RAMAN*. Este método, pela sua sensibilidade, é capaz de distinguir as várias fases do carbono tais como a grafite, diamante, carbono amorfo ou hidrogenado.

A tabela seguinte mostra a correlação entre algumas frequência do espectro de *RAMAN* e as diferentes fases do carbono.

**Tabela 3 – Características do espectro de Raman para diferentes bandas** <sup>[80] – [84]</sup>.

Referência	Fase de carbono	Frequência cm <sup>-1</sup>
[80]	Diamante natural	1331-1336
[81]	DLC	1355-1580
[82]	Carbono amorfo	1500
[82]	Estruturas sp <sup>2</sup> amorfas	1480
[83]	Banda G (Grafite)	1560
[84]	Banda D (Grafite microcristalina)	1600

Através a análise do espectro obtido por *RAMAN* é possível avaliar qualitativamente a presença de fases não adiamantadas, a cristalinidade e a tensão interna do filme.

Do espectro de RAMAN, facilmente se pode obter a proporção de diamante, ( $C_d$ ), em relação a todas as outras fases de não diamante numa abordagem relativamente simples. Tal proporção é dada pela relação da área dos picos de diamante em relação ao somatório da área de todos os picos. Esta relação é traduzida pela expressão <sup>[85]</sup> ( 7):

$$C_d = \frac{A_{\text{diamante}}}{A_{\text{diamante}} + \sum A_{\text{Outras bandas}}} \times 100 \quad (7)$$

Outro parâmetro importante na caracterização de filmes de diamante em ferramentas de corte é a tensão residual do filme. Esta tensão pode ser calculada a partir da equação <sup>[86] – [87]</sup> ( 8), onde  $\Delta\nu$  é a diferença entre o desvio do pico de diamante do espectro em relação ao que seria de esperar (1332 cm<sup>-1</sup>).

$$\sigma \cong \frac{\Delta\nu}{2,9} [GPa] \quad (8)$$

As intensidades destas bandas, estão por vezes associadas às condições de deposição e tanto podem ser devidas à grafite <sup>[88] – [90]</sup> ou a carbono amorfo <sup>[89] – [90]</sup>, não obstante, a intensidade e a posição de alguns desses picos de não diamante também depende do comprimento de onda de excitação usado para obter o espectro e são normalmente interpretados como uma variação da absorção do laser por fases de não diamante para os diferentes comprimentos de onda <sup>[91] – [92]</sup>.

### **2.1.4. Adesão do filme ao substrato**

Em qualquer revestimento um ponto determinante para o correcto funcionamento do filme é a adesão do revestimento ao substrato. De acordo com a definição da ASTM (D907-70),<sup>[93]</sup> a adesão é o estado em que duas superfícies são mantidas juntas por forças na interface. Um teste normalmente utilizado para caracterizar a adesão de filmes é o teste da adesão por indentação.

Efectuando o teste de indentação é possível determinar a resistência à fractura ( $Kc$ ) em função da carga aplicada e do raio da deitado pela indentação através da expressão ( 9 )<sup>[94]</sup>, onde  $P$  é a carga aplicada e  $c$  é o raio da indentação.

$$Kc = \xi(E / H)^{1/2} (P / c^{3/2}) \quad (9)$$

Onde  $E$  é o modulo de Young e  $H$  a dureza medida. O parâmetro  $\xi(=0,016\pm0,004)$  é um valor empírico que deriva de uma constante de correcção da relação entre a tenacidade à fractura e o valor da indentação para vários materiais<sup>[95]</sup>.

A resistência à propagação da fractura ao longo da interface é utilizada como método para analisar semi-qualitativamente a adesão do filme, por analogia com a fractura em sólidos homogéneos<sup>[96] – [99]</sup>.

No âmbito desta tese, para caracterizar a adesão foi efectuado o teste de indentação com um indentador *Brinell*, com 200 $\mu$ m de raio, o que permitiu comparar as imagens obtidas a partir do microscópio e verificar qual o filme tem uma adesão superior<sup>[100], [101]</sup>.

## **2.2. Amostras utilizadas – Propriedades**

Foram utilizadas matrizes de corte em metal duro micro grão, fornecido pela DURIT, e com um teor de 10% de cobalto. Normalmente, o metal duro com estas propriedades é utilizado em ferramentas para micro-maquinagem, tais como brocas de dentista, ferramentas cirúrgicas, micro-mandris, ferramentas de prensagem de pós para a indústria farmacêutica, punções e matrizes de corte<sup>[55]</sup>.

### ***2.3. Preparação de amostras e pré-tratamentos***

Ao longo das próximas linhas encontra-se descrito o procedimento experimental seguido ao longo do trabalho na preparação e tratamento das amostras.

#### ***2.3.1. Tratamento químico***

Para deposições de diamante, o tratamento das superfícies é efectuado por via química, sendo este tratamento utilizado para remover de forma selectiva cada um dos constituintes da superfície a depositar.

Para que o filme tenha adesão ao substrato, há necessidade de remover os grãos de carboneto de tungsténio que foram danificados pela operação de rectificação, bem como remover o cobalto presente na superfície <sup>[112]</sup>.

O ataque químico mais comum usado para remover o carboneto de tungsténio é feito com uma solução de ferro-cianeto de potássio e hidróxido de potássio em água ( $10g K_3(Fe(CN)_6) + 10g KOH + 100ml H_2O$ ). Esta solução é designada por *Murakami* <sup>[106]</sup>. Segundo Gil Cabral <sup>[107]</sup>, usando *Murakami* a taxa de remoção de carboneto de tungsténio é independente do tamanho de grão e a 25°C é de 0,28  $\mu m/min$ .

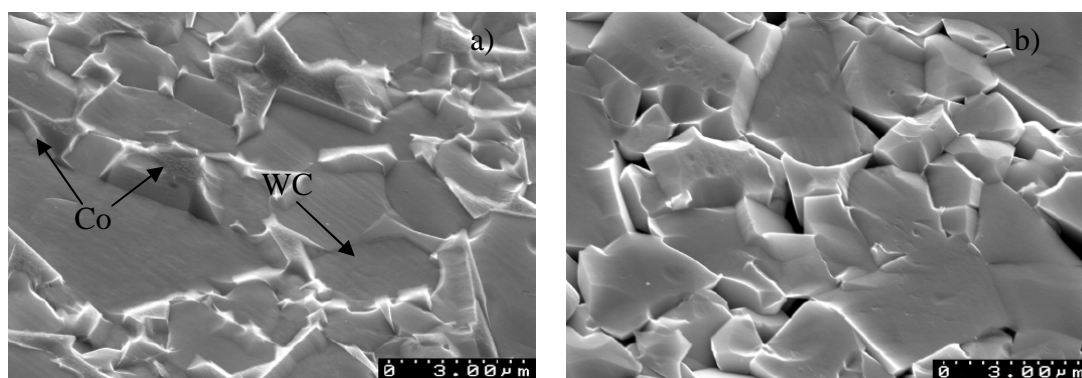
Para remover o cobalto da superfície foi usada uma solução de ácido nítrico, ( $1ml 46 - wt.\% HNO_3 + 9ml 30\% m/v H_2O_2$ ). Gil Cabral <sup>[107]</sup>, concluiu que no micro grão são necessários 10seg de ataque para remover completamente o cobalto da superfície. Antes de ser iniciado qualquer tipo de tratamento, todas as amostras devem ser devidamente limpas e desengorduradas com acetona em ultra-sons durante um tempo mínimo de 15min.

O procedimento de trabalho seguido é apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4 – Tratamento químico das amostras.**

	<i>Murakami</i> [min]	Ácido nítrico [min]	Água de lavagem desionizada [min]		
			1º	2ª	3ª Em ultra- sons
Passo 1	7,5	0	2	2	1
Passo 2	0	0,25	2	2	1

As Figuras seguintes mostram uma amostra de metal duro, micro grão, atacada com *Murakami*, Figura 10a) e depois atacada com ácido nítrico, Figura 10b) nas condições da tabela acima.



**Figura 10 – Tratamento químico a) *Murakami* durante 7'30''; b) *Murakami* durante 7'30'' e solução de ácido nítrico durante 15''.**

A análise SEM à amostra atacada só com *Murakami*, (Figura 10 a)), mostra que com a remoção do carboneto de tungsténio à superfície ocorreu um aumento de rugosidade. Na análise EDS localizada, verificou-se a presença de cobalto na superfície da amostra.

Já na análise EDS à amostra atacada com a solução de ácido nítrico, (Figura 10 b), verificou-se que na superfície não foi encontrado cobalto. Tal facto acontece porque o ácido nítrico ataca efectivamente o cobalto.

O aumento de rugosidade superficial é benéfico para adesão do filme, uma vez que funciona como encravamento mecânico do filme <sup>[108]</sup>.

### 2.3.2. Tratamento térmico

Outro tipo de tratamento de superfícies explorado foi o tratamento térmico. Este, consiste na colocação das amostras no reactor e elevadas a uma temperatura e tempo suficiente para que ocorram modificações na superfície da amostra por ressinterização do metal duro.

De acordo com *Pollini et. al.*,<sup>[108]</sup> a ressinterização do metal duro ocorre para temperaturas superiores a 1000°C. No entanto, é essencial otimizar o tempo necessário para que ocorram as modificações pretendidas: Crescimento do grão de tungsténio e rearranjo dos grãos destruídos pela operação de rectificação e a difusão do cobalto à superfície.

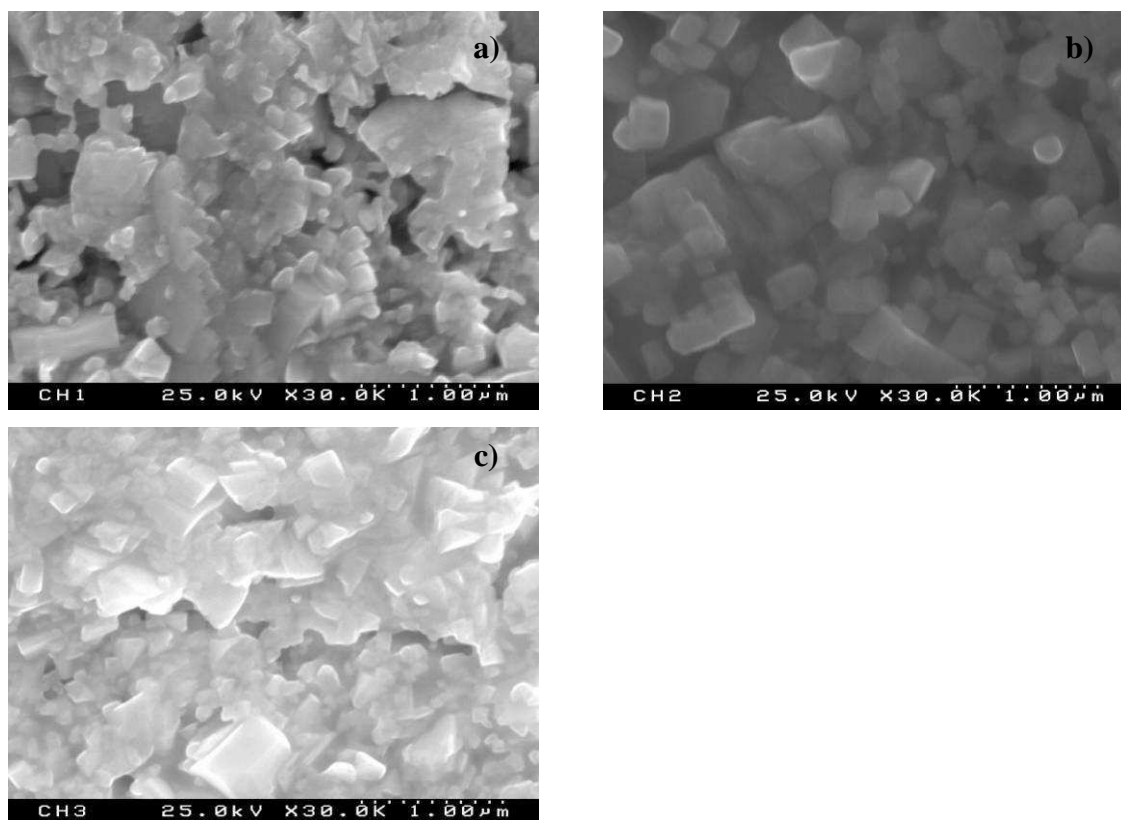
Foram elaboradas uma série de tratamentos térmicos como se mostra na tabela seguinte:

**Tabela 5 – Tratamentos térmicos efectuados**

Amostra	Temperatura [°C]	Pressão [torr]	Composição % CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	Tempo [min]	Altura* [mm]
CH1	1000	25	1	60	4
CH2	1000	25	1	120	4
CH3	1000	25	1	180	4

\* Distancia da superfície da amostra aos filamentos.

As figuras seguintes, obtidas na análise SEM, representam os tratamentos térmicos correspondentes à tabela anterior.



**Figura 11 – Tratamento térmico; A)1h, B) 2h, C) 3h.**

Na Figura 11 c), que representa o tratamento térmico efectuado durante 3 horas, observa-se que o grão de tungsténio à superfície se encontra bem definido. Porém, utilizando o EDS localizado, foi possível encontrar algum cobalto. Por este facto seria necessário expor a amostra a temperaturas mais elevadas e/ou durante um período de tempo mais prolongado. No entanto, é mais fácil combinar o tratamento térmico com o ataque químico ao cobalto, isto é, depois do tratamento térmico deve-se atacar a amostra com a solução de ácido nítrico conforme visto na secção anterior.

### **2.3.3. Seeding**

O processo de *seeding* utilizado no decorrer deste trabalho é feito utilizando um ultra-sons convencional com uma suspensão de diamante em etanol PA numa concentração de 0.1g/ml <sup>[109]</sup>.

Este processo obedece a algumas etapas, sejam:



- a. Limpeza do substrato; Nesta fase o substrato deve ser limpo e isento de poeira, gordura ou qualquer outro tipo de resíduos. Normalmente usa-se um banho de acetona ou etanol em ultra-sons num período superior a 5min;
- b. Colocação da amostra no pó em suspensão em ultra-sons; Este passo é de extrema importância, pois esta pequena parte do processo é que vai permitir semear diamante na superfície para que haja crescimento. Esta etapa normalmente é curta, e neste caso foi sempre de 20min. <sup>[107]–[109]</sup>.

É importante que a solução esteja homogénea, isto é, que o pó de diamante esteja devidamente disperso no etanol.

- c. Limpeza do pó de diamante; Nesta fase o substrato após retirado do banho de diamante é colocado num banho de etanol e posteriormente de acetona em ultra-sons durante 1min <sup>[110]</sup>. Assim é possível remover as partículas de diamante que não estão agarradas ao substrato.

Após estas etapas o substrato estará pronto para ser levado ao reactor para fazer o crescimento de diamante.

Numa tentativa de encontrar um processo de *seeding* homogéneo, foram desenvolvidas um conjunto de experiências que permitiram determinar qual o método e o tipo de diamante que garante a maior homogeneidade do filme de diamante, usando os recursos do laboratório de engenharia das superfícies do TEMA. Foram utilizados dois tipos de diamante: diamante natural e diamante sintético ambos com um grão médio de  $0.25\mu\text{m}$  <sup>[111]</sup> com dois métodos distintos: suspenso e no fundo.

O método da amostra suspensa consiste simplesmente em manter a amostra no interior de um saco de rede emerso na solução de diamante em ultra-sons.

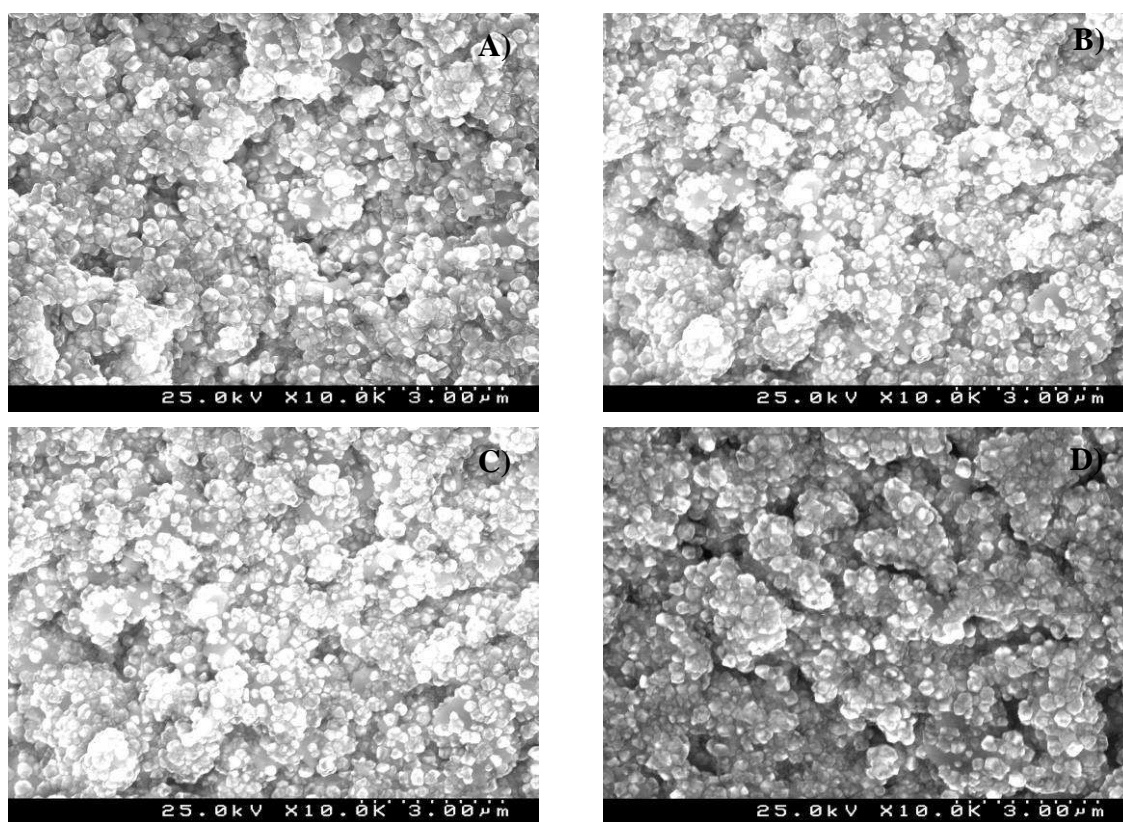
Após o referido *seeding*, as amostras foram levadas ao reactor durante duas horas para o processo de nucleação nas condições da Tabela 6 e posteriormente analisado o filme por microscopia óptica de varrimento.

Um resumo das condições de *seeding* e nucleação são apresentados na tabela seguinte.

**Tabela 6 – Resumo das condições de *seeding* e de nucleação**

Amostra	<i>Seeding</i>			Nucleação				
	Diamante	Método	Tempo <sup>[111]</sup> [min]	Pressão [torr]	Temp. [°C]	Tempo [min]	Altura* [mm]	H2/CH4 [%]
A1	Natural	Suspenso	20	25	800	120	8	1
A2	Sintético	Suspenso	20	25	800	120	8	1
A3	Natural	Fundo	20	25	800	120	8	1
A4	Sintético	Fundo	20	25	800	120	8	1

\* Distância da superfície da amostra aos filamentos



**Figura 12 – Seeding e nucleação de acordo com a tabela 6; painel a) amostra A1, painel b) amostra A2, painel c) amostra A3, painel d) amostra A4**

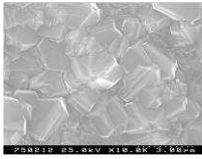
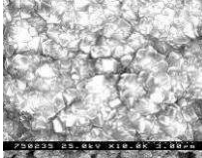
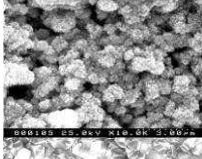

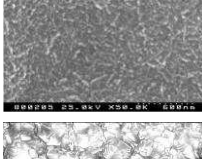
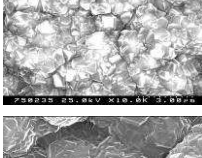
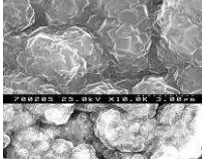
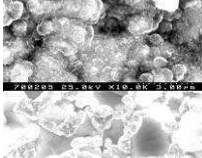
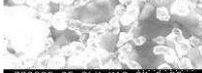
Análise de SEM, a partir da qual foram obtidas as imagens Figura 12, permitiram concluir que nas condições referidas anteriormente, o filme se encontra devidamente fechado e com o grão bem definido em todas as amostras. No entanto, na amostra A1, verifica-se que o filme é o que cresceu de forma mais homogênea em toda a área de deposição relativamente às restantes.

Assim, embora com muitas semelhanças, constata-se que nas condições testadas, o *seeding* efectuado com diamante natural e com a amostra suspensa é o mais indicado.

#### ***2.4. Condições de deposição***

O primeiro passo passou por conhecer o que poderão ser as condições óptimas de crescimento de diamante no reactor CVD usado. Foram efectuadas inúmeras deposições nas mais diversas condições de crescimento que posteriormente foram analisadas. A Tabela 7 apresenta um resumo das deposições efectuadas, bem como as imagens de SEM obtidas na análise.

**Tabela 7 – Resumo das condições de deposição.**

	Pressão [torr]	Temp. [°C]	[%] Ch <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	Tempo de deposição [Horas]	Imagem SEM	Observações
Série 1	12	750	1	8		- Diamante cristalino; - Filme fechado e homogéneo; - Presença de cobalto;
Série 2	15	750	1	8		- Diamante cristalino; - Filme fechado;
Série 3	5	800	0,5	8		- Filme aberto; - Presença de fases de não diamante; - Presença de cobalto;
Série 4	25	750	1	6		- Diamante cristalino; - Filme fechado; - Cristais pequenos;
Série 5	5	800	0,5	8		- Grão muito pequeno; - Presença de fases de não diamante; - Filme aberto
Série 6	35	750	1	10		- Filme cristalino; - Filme fechado; - Cristais grandes - Vestígios fases não diamante;
Série 7	5	750	1	12		- Filme não homogéneo; - Presença fases e não diamante;
Série 8	5	750	1	10		- Filme aberto; - Grãos mal definidos;
Série 9	35	700	1	4		- Filme aberto;

Da análise efectuada aos dados da tabela anterior, verifica-se que para o reactor usado, as condições às quais se obtêm o filme de diamante com melhor qualidade são as deposições efectuadas nas condições das séries 1, 2, 4 e 6.

No entanto, pelo facto de cada ensaio de corte ser relativamente moroso, em média 3 semanas, apenas houve possibilidade de testar três séries de amostras, sendo as amostras 1, 4 e 6 escolhidas, uma vez que são as que apresentam o filme com melhor qualidade e com características ligeiramente diferentes.

### **Capítulo III**

*Neste capítulo são apresentados os testes de desempenho das matrizes revestidas nas condições da tabela 8, bem como a caracterização SEM e RAMAN de cada um dos filmes testados.*

*Para avaliar os testes de desempenho foi medido e comprado o desgaste da aresta de corte.*

#### **3.1. Caracterização dos filmes de diamante**

As amostras revestidas com filmes de diamante crescidos por HFCVD nas condições da Tabela 7, foram caracterizados usando diferentes técnicas. A pureza do diamante, a percentagem de diamantes no filme em relação à quantidade de material de não diamante presente no filme e o estado de tensão do filme foram obtidos através da análise do espectro de *RAMAN*. Os dados retirados desta análise são apenas semi-quantitativos, o que significa que são comparáveis apenas entre si. O teste de identificação permitiu verificar qual das amostras à partida tem melhor adesão, e a análise de SEM permitiu ver o tamanho dos cristais e a homogeneidade do filme.

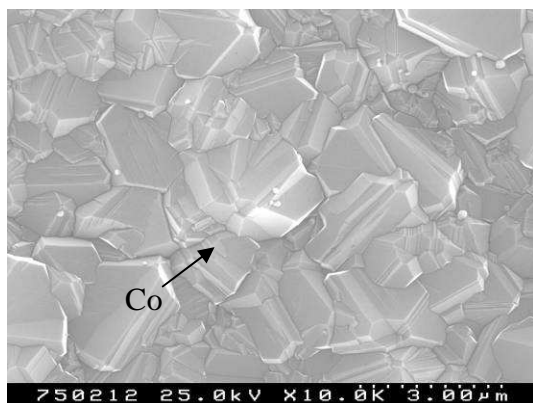


Figura 13 – Análise de SEM – Serie 1

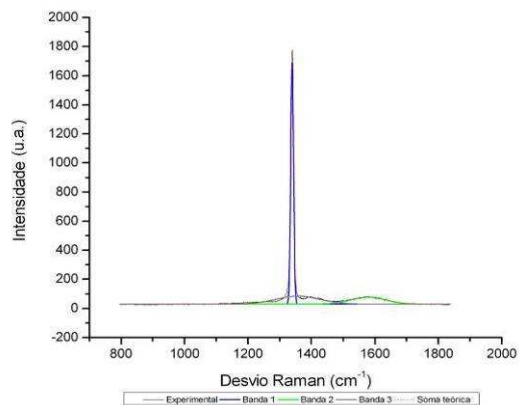


Figura 14 – Análise Raman – Serie 1

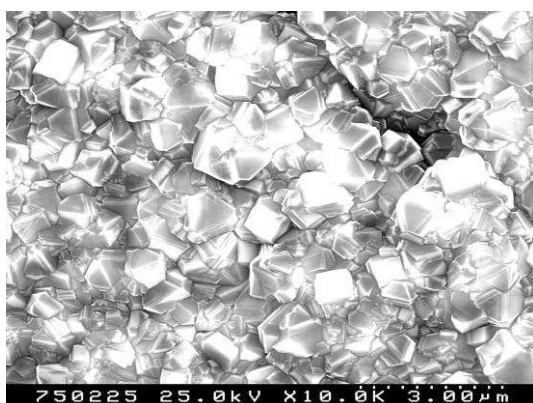


Figura 15 – Análise de SEM – Serie 4

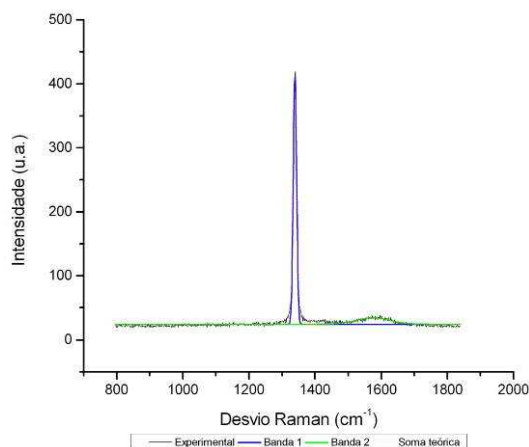


Figura 16 – Análise Raman – Serie 4

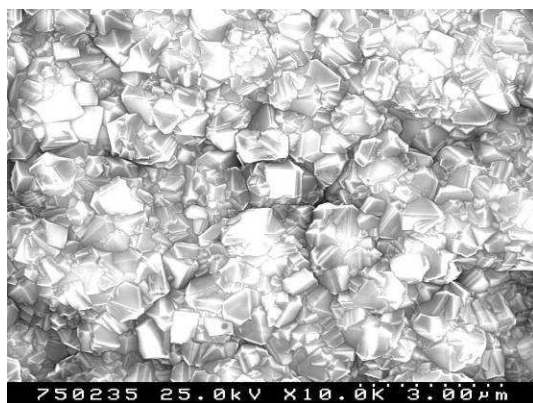


Figura 17 – Análise de SEM – Serie 6

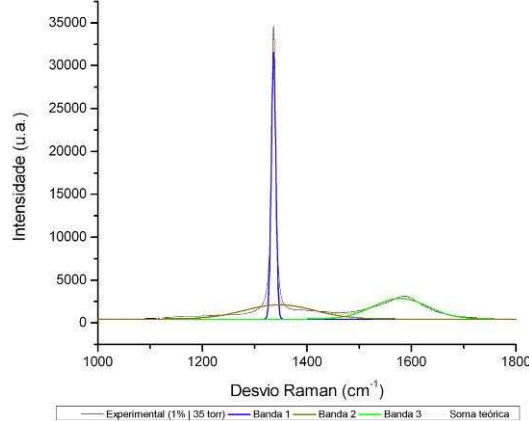
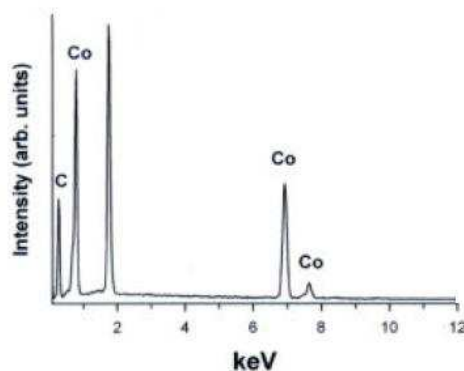


Figura 18 – Análise Raman – Serie 6

Após a análise de SEM, verifica-se que em todas as amostras o filme se encontra fechado e homogéneo. Na análise de EDS, Figura 19, efectuada à amostra da série 1 verifica-se que houve difusão de cobalto, tal facto deve-se à exposição a temperatura elevada por um elevado período de tempo. Este fenómeno deve ser evitado, pois, a adesão fica comprometida com a presença do cobalto no filme <sup>[112]</sup>.

Quanto aos filmes das séries 4 e 6, Figura 17 e Figura 18 respectivamente, verifica-se que os grãos de diamante cresceram no plano  $\{1, 1, 1\}$ , o que significa que cresceram na mesma proporção nas três direcções.

No entanto, todos os filmes contêm grafite, facto comprovado pelos espectros de RAMAN, figuras 21, 23 e 25, pois todos têm um pico aos  $1560\text{ cm}^{-1}$  [83].



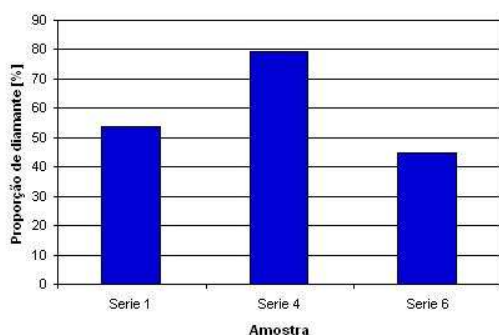
**Figura 19 – EDS Localizado – Serie 3**

A análise EDS localizada, efectuada à amostra da série 1, prova a existência de cobalto como se pode observar na figura acima.

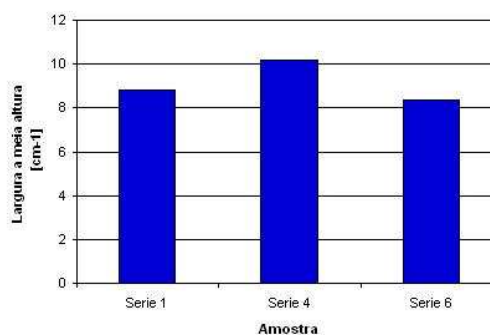
Para além da análise de SEM realizada anteriormente, foi de todo o interesse efectuar a análise de *RAMAN*, pois assim facilmente se pode tirar conclusões quanto à pureza do diamante e ao estado de tensão do filme bem como determinar a proporção de diamante existente no filme.

As figuras seguintes mostram a análise efectuada aos espectros de RAMAN obtidos.

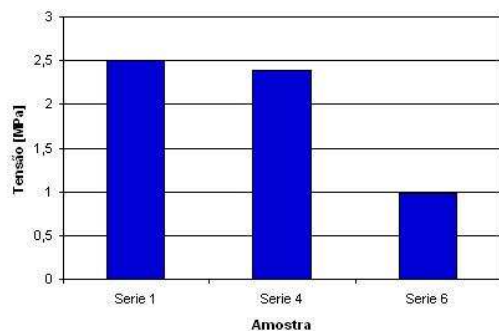




**Figura 20 – Análise do espectro de RAMAN**  
**Proporção de diamante**



**Figura 21 – Análise do espectro de RAMAN**  
**Pureza do diamante**



**Figura 22 – Análise do espectro de RAMAN**  
**Tensão do filme**

A partir da Figura 20 verifica-se que na amostra da série 4 existe uma proporção de diamante de cerca de 80%, enquanto que na serie 1 e 6, estas são de 55% e 45% respectivamente.

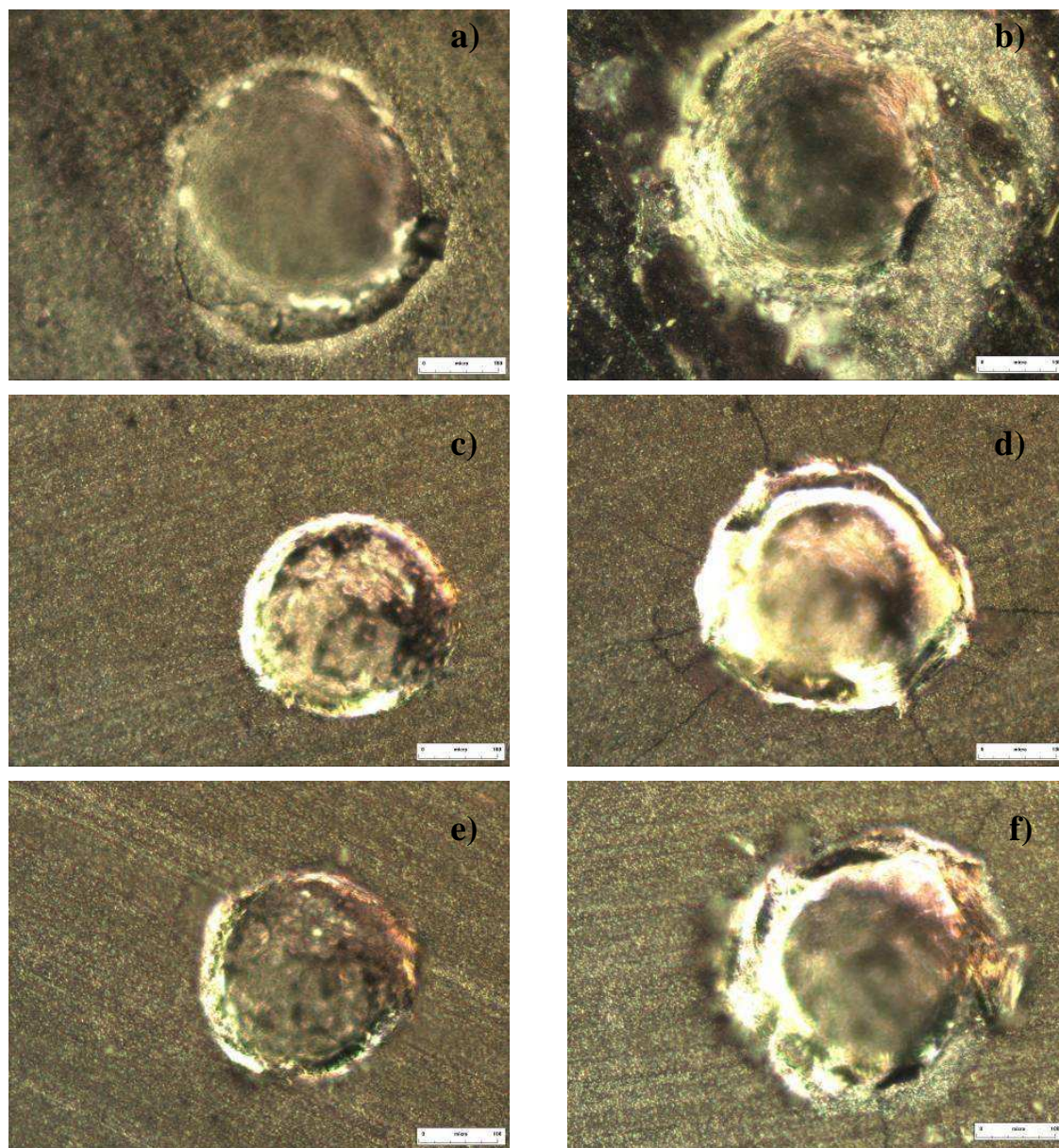
No que toca à pureza do diamante, FWHM, dada pela largura a meia altura do pico respectivo, a amostra da série 4 é a que possui o diamante mais puro. Quanto à tensão do filme, a amostra da série 6 é a que tem o filme menos tensionado, apenas 1MPa.

### **3.2. Teste de adesão**

No âmbito deste estudo não foi medida quantitativamente a adesão dos filmes. No entanto, foi efectuado o teste de indentação e comparadas qualitativamente as imagens obtidas de modo a perceber qual o filme que tem maior adesão.

Foram efectuadas várias indentações com cargas de 20, 22.5, 30, 50 e 62.5 Kgf, em zonas distintas da amostra e analisado o seu efeito no microscópio óptico.

A Figura 23 mostra as identações efectuadas com cargas de 30 e de 50kgf nas colunas da esquerda e da direita respectivamente, pois só com a carga de 30kgf é que se verificou alteração ao filme, sendo que a esta carga ainda não são significativas.



**Figura 23 – Imagem das várias identações efectuadas; painel a) série 1, 30kgf; painel b) série 1 50kgf; painel c) série 4 30kgf; painel d) serie 4 50kgf; painel e) série 6 30kgf painel f) série 6 50kgf;**

Com a aplicação da carga de 30kgf, coluna da esquerda, o filme começou a ceder, sendo que as alterações não são significativas. No entanto, verifica-se que no caso do filme da série 1, a indentação é ligeiramente superior às restantes.

Já no caso da carga de 50kgf é notório que todos os filmes foram gravemente afectados. Facilmente se verifica que no caso da série 1, o filme não ofereceu qualquer resistência. No caso das séries 4 e 6, verifica-se que o filme delaminou na zona da indentação, no entanto, no caso da série 4, a área de filme delaminado é ligeiramente inferior à da serie 6.

Assim, pode-se concluir que das amostras analisadas, a amostra da série 4, é aparentemente a que tem melhor adesão.

Este teste poderá ser um bom indicador quanto ao comportamento do filme nas condições de corte, contudo apenas seria possível quantificar quantitativamente a adesão destes filmes com uma análise de *RAMAN* e/ou SEM.

### ***3.3. Testes de desempenho***

A avaliação do desempenho dos filmes de diamante foi dividida em dois pontos distintos: testes mecânicos e qualidade do corte no produto acabado. Nos testes mecânicos, foram medidos e comparados os desgastes das matrizes revestidas e não revestidas respectivamente. Já na qualidade do produto acabado, foi analisado a o estado do corte na lixa.

#### ***3.3.1 Testes mecânicos***

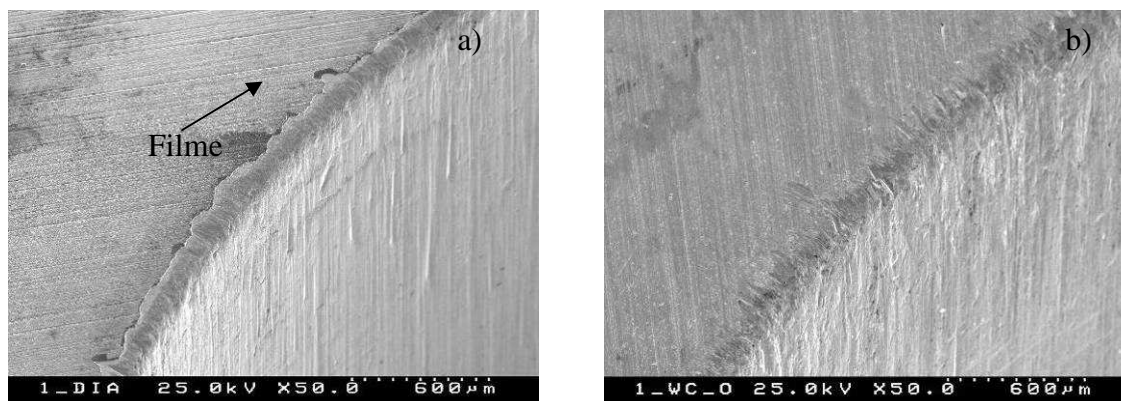
Os testes mecânicos das matrizes de corte foram efectuados em ambiente industrial e de acordo com o plano de trabalho implementado na empresa, INDASA Industria de abrasivos S.A. Normalmente, cada conjunto de ferramentas é usado para fazer um programa de corte.

Após a montagem de cada matriz na ferramenta de corte, em circunstâncias normais, são efectuados cerca de 1200000 cortes em lixas de diversos grãos. O corte é efectuado começando nos grãos mais finos até aos grãos grossos, pois é necessária uma folga

superior entre a matriz e o punção para cortar os grãos mais grossos. A este processo, chama-se programa de corte ou programa de trabalho da ferramenta.

No fim de cada programa de corte, as matrizes de corte são rectificadas e voltam a ser usadas. Normalmente as matrizes são rectificadas no máximo três vezes.

Na Figura 24 pode ser observado o estado da aresta de corte nas amostras com e sem revestimento, após efectuados os cortes de um programa completo.

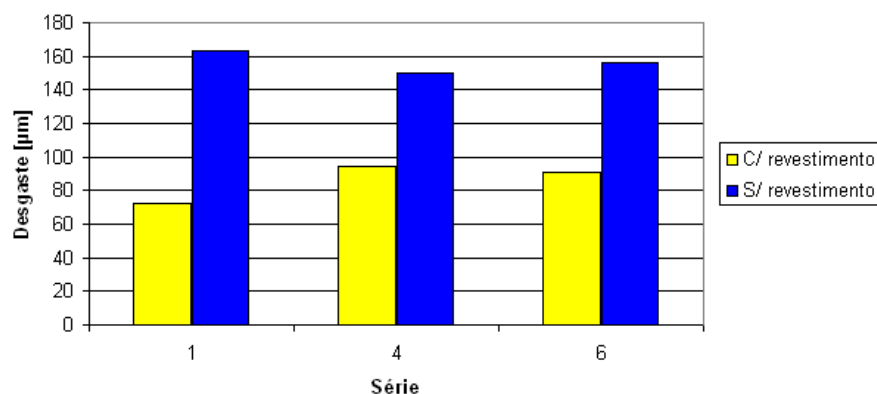


**Figura 24 – Imagem representativa da aresta de corte após testes; painel a) Matriz revestida; painel b) Matriz não revestida.**

Da análise das figuras anteriores facilmente se verifica que a matriz não revestida perdeu poder de corte, pois esta tem a aresta de corte com um boleado superior à aresta dos matizes revestidas. Nesta amostra verifica-se também a existência de um número de “rasgos” na aresta de corte superior à matriz revestida, tal facto também se verifica na zona interior da ferramenta.

Para medir o desgaste na aresta de corte foi utilizado o microscópio óptico. Foram efectuadas 20 medidas em cada matriz, escolhendo aleatoriamente 10 pontos mais próximos da aresta e 10 pontos mais afastados, para que os dados obtidos sejam representativos do desgaste em toda a aresta de corte.

A figura seguinte mostra a comparação entre o desgaste médio de cada ferramenta de corte.



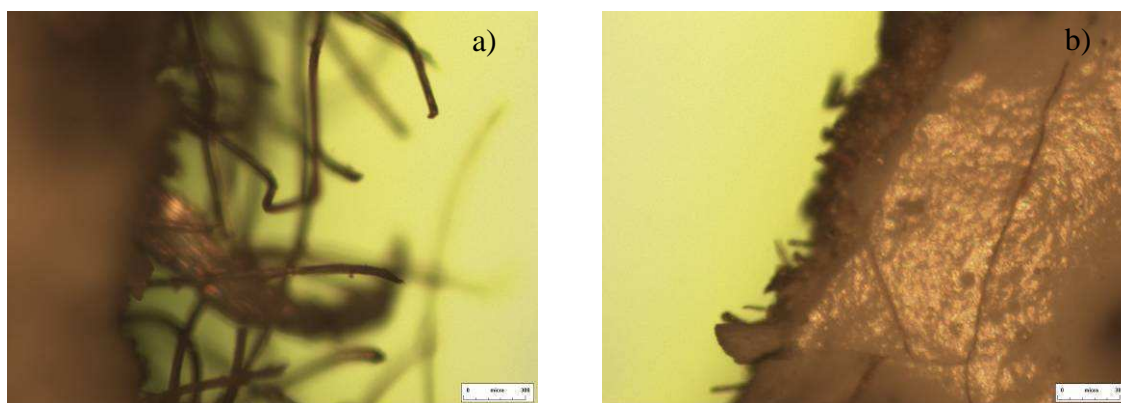
**Figura 25 – Desgaste das matrizes de corte**

Da análise do gráfico anterior, verifica-se que todas as matrizes revestidas tiveram um desgaste bastante inferior quando comparadas com matrizes sem qualquer revestimento. Na série 1 foi onde se verificou a diferença mais acentuada.

### ***3.3.1.1. Qualidade do corte***

Uma vez efectuados os testes, foi analisada a qualidade do corte de modo a verificar as diferenças na qualidade do corte.

As figuras seguintes mostram o corte efectuado usando uma matriz revestida e uma matriz não revestida respectivamente.



**Figura 26 – Zona de corte na lixa; painel a) Corte com matriz não revestida; painel b) Corte com matriz revestida;**



Embora no controlo visual, as lixas não apresentem diferenças relevantes quanto à qualidade do produto, microscopicamente existem diferenças notáveis.

Na Figura 26, A), verifica-se que durante o processo de corte houve arrastamento de material, deixando bastante quantidade de velcro na zona de corte, facto que não aconteceu no corte efectuado com matrizes revestidas. Tal deve-se ao facto da aresta ter perdido poder de corte.

### **3.3.2. *Teste mecânico em contínuo***

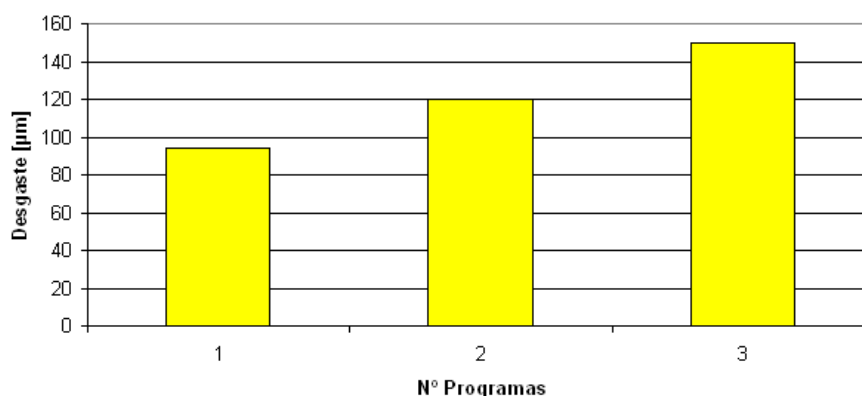
Experiências anteriores demonstraram que não é conveniente iniciar um segundo programa de corte sem rectificar as matrizes.

A folga já existente entre a matriz e o punção e o aumento da folga durante a execução do segundo programa raramente permite que este fosse concluído sem que surgisse a necessidade de mudar as matrizes.

No entanto, ao usar matrizes revestidas verificou-se que o desgaste foi significativamente menor. Por tal facto foi efectuado um teste utilizando matrizes que já haviam efectuado um programa de corte.

Após o término dos testes constata-se que estes decorreram com sucesso, pois todas as lixas cortadas passaram no controlo de qualidade.

A Figura 27 mostra a evolução do desgaste das matrizes de corte revestidas.



**Figura 27 – Desgaste das matrizes de corte revestidas.**

Da análise do gráfico anterior, para os três programas de corte verifica-se que as matrizes revestidas, mesmo após terem sido sujeitas ao triplo dos cortes apresentam um desgaste aproximado do desgaste obtido nas matrizes não revestidas, 150µm, para apenas um programa de corte.

Apesar das matrizes revestidas após o primeiro programa de corte não possuírem diamante na aresta continuam com diamante nas zonas circundantes, o que retarda o desgaste na zona da aresta.

Contudo, no final dos testes, verificou-se que na parte superior da matriz o filme de diamante já estava bastante gasto deixando pontualmente à vista os grãos de carboneto de tungstênio. Isto significa que o desgaste na parte superior da matriz tem valores significativos não considerados até então.





## Capítulo IV

*Paralelamente ao estudo dos filmes de diamante em WC-Co, desenvolveu-se uma ferramenta de corte multi-furo para cortar tela abrasiva. É objectivo primordial desenvolver uma ferramenta com dois postos de trabalho e que em cada um deles cortasse um disco e simultaneamente efectua-se a respectiva furação.*

### 4.1. Desenvolvimento de uma ferramenta combinada

Para efectuar o corte de tela abrasiva podem ser usados vários processos, de entre os quais se destacam o LASER o jacto de água <sup>[6]</sup> e o corte mecânico. O LASER, apesar da simplicidade de trabalho e da facilidade na obtenção de qualquer geometria tem alguns inconvenientes. O processo é moroso e junto à zona de corte danifica o abrasivo perdendo assim poder de corte <sup>[6]</sup>. Já no caso do jacto de água, este tem o principal inconveniente de ser necessário posteriormente secar convenientemente toda a lixa o que se traduz num aumento significativo nos custos de movimentação, aumento dos custos energéticos com a secagem bem como um aumento do tempo de produção.

Por estas razões é comum a utilização do corte mecânico por prensa.

Contudo, a complexidade geométrica da lixa a obter não foi por si só o problema maior. Uma série de outras limitações físicas foram impostas logo à partida. Estas encontram-se descritas na Tabela 8.

**Tabela 8 – Limitações físicas da ferramenta**

Parâmetro	Valor
Abertura máxima da ferramenta	145mm
Postos de corte	2
Largura da tela a cortar	308mm
Folga máxima entre matriz e punção	0,05mm
Penetração mínima dos punções na matriz	5mm
Custo	Mínimo

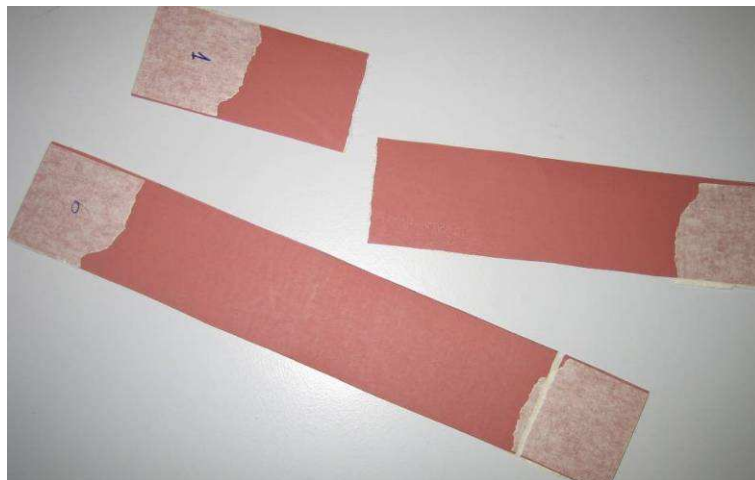
Outro dos objectivos que se pretendia era que existisse alguma facilidade na mudança dos punções e da lâmina de corte e que o processo de mudança permitisse manter o alinhamento entre os punções e a matriz.

Foi aproveitado o conhecimento empírico de pessoas que contactam de perto com este tipo de indústria tal como o processo de corte e respectivos materiais usados em ferramentas de corte já existentes.

## ***4.2.Dimensionamento***

### ***4.2.1.1. Determinação da tensão de ruptura da lixa***

Para dimensionar correctamente os punções bem como determinar todas as forças de corte associadas a esta operação foi necessário determinar a tensão de ruptura da tela abrasiva a cortar. Para tal, foram efectuados ensaios de tracção em provetes de tela abrasiva com grãos de 500 e de 1200, pois são os grãos máximos e mínimos a cortar. A Figura 28 mostra os provetes ensaiados.



**Figura 28 – Provetes ensaiados**

**Tabela 9 – Dados do ensaio**

Nome		RGripRLP500 / RGripRLP1200
Velocidade de teste	[mm/min]	100
Largura	[mm]	50
Espessura	[mm]	1
Comprimento de teste	[mm]	260

Na tabela seguinte estão representados os dados obtidos após terem sido efectuados os testes ao 6 provetes de cada grão respectivamente.

**Tabela 10 – Dados do ensaio de tracção**

	RGripRLP500				RGripRLP1200			
	Máximos		Ruptura		Máximos		Ruptura	
	Carga [N]	Extensão [mm]	Carga [N]	Extensão [mm]	Carga [N]	Extensão [mm]	Carga [N]	Extensão [mm]
Média	627,9	6,4	521,6	7	639,9	6,1	529,2	6,7
Desvio padrão	45,95	0,74	253,35	1,6	45,95	0,48	291,89	1,32
Max	685,5	7,3	685,5	9,9	694	6,8	694,0	9,0
Min	570	5,4	12,5	5,4	578	5,6	11,0	5,6

É de toda a importância dimensionar todos os componentes da ferramenta para o valor máximo da força aplicada. A tensão de ruptura da tela é de 13,71 MPa.

#### ***4.2.1.2. Força de corte por punção***

A força de corte de um punção com a configuração adoptada deve ser calculada pela expressão ( 10), sendo:

$$F_c = L \cdot e \cdot R_c \quad (10)$$

Onde  $F_c$  representa a força de corte necessária,  $L$  é o perímetro de corte,  $R_c$  é a resistência ao corte do material,  $e$  é a espessura da lixa.

A resistência ao corte  $R_c$  depende do material a cortar, normalmente por ser considerado uma boa aproximação <sup>[114]</sup> é calculado da seguinte forma:

$$R_c = 0.8 \cdot \sigma_r \quad (11)$$

Logo fica:

$$F_c = 2\pi r \cdot e \cdot 0.8 \cdot \sigma_r \quad (12)$$

#### 4.2.1.3. Força de corte da lâmina

Para efectuar o corte do disco é usada uma lâmina comercial da *Sandvik* conforme representado na Figura 30.

No caso do corte da lâmina, o corte não se efectua por arrombamento, mas sim premindo a lâmina contra um material mais dúctil denominado contra-lâmina. Um esquema da montagem da contra-lâmina encontra-se representado na Figura 30.

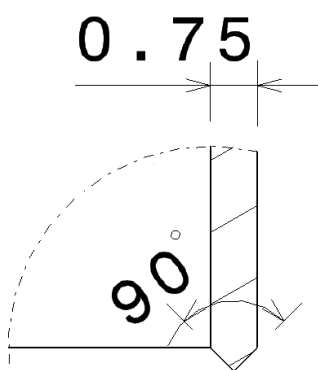


Figura 29 – Configuração da lâmina

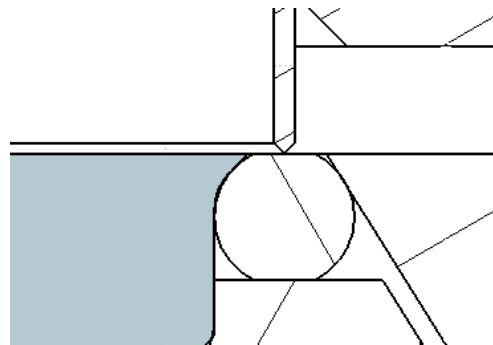


Figura 30 – lâmina e contra-lâmina

O corte inclinado é usado, normalmente, para reduzir os esforços de corte. No caso de estarmos a falar de punções em corte por arrombamento, a inclinação das arestas não deve ultrapassar os  $4^\circ$  <sup>[77]</sup>.

Para calcular o esforço de corte na lâmina podemos aplicar a mesma expressão usada para calcular a força de corte nos punções.

#### 4.2.1.4. Forças de extracção

Para libertar as peças dos punções e da lâmina, foi pensado um simples sistema de extracção como mostra a Figura 31.

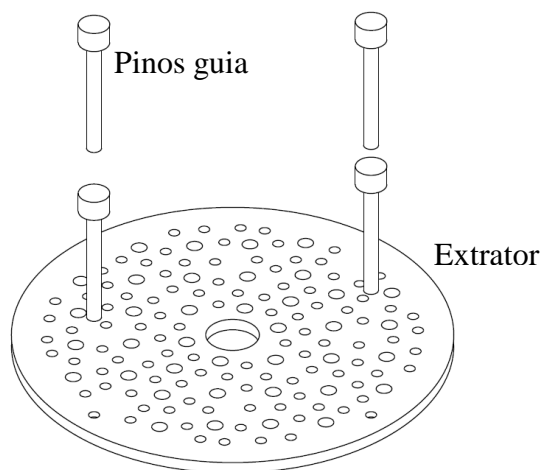


Figura 31 – Sistema de extracção

Este sistema consiste numa simples placa em alumínio com uma furação coincidente com a furação da lixa a obter. Acoplada a esta placa estão 4 pernos que funcionam como guia e neles são montadas molas que permitem extrair a lixa dos punções.

A Figura 32 representa a montagem do sistema de extracção projectado.

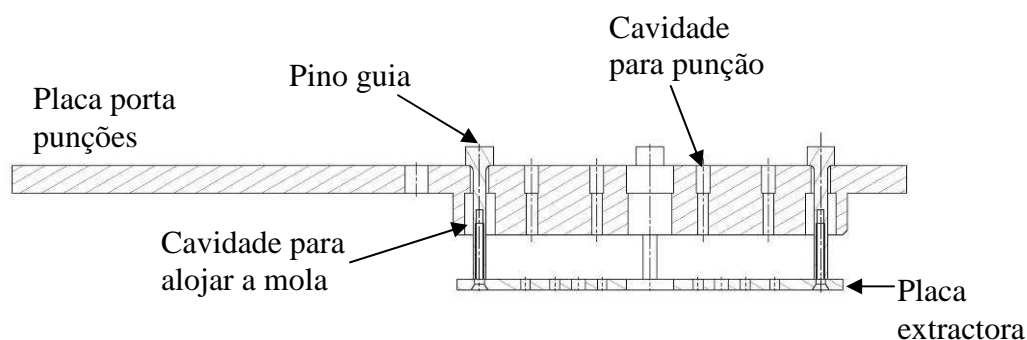


Figura 32 – Montagem do sistema de extracção

A força de extracção normalmente representa 10 a 15% <sup>[75]</sup> da força total de corte.

#### **4.2.1.5.Molas**

Para fazer a recuperação da ferramenta e para o sistema de extracção foram seleccionadas molas catalogadas e utilizadas na indústria de moldes.

As molas seleccionadas para este sistema têm uma constante elástica de 1,79kg/mm, e para a recuperação da ferramenta a constante elástica das molas é de 41,31kg/mm.

#### **4.2.1.6.Força total**

A Tabela 11, mostra de forma resumida, as forças necessárias por cada operação de corte.

**Tabela 11 – Resumos das forças a aplicar.**

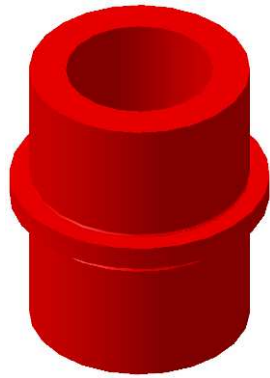
Elemento	Força por elemento [N]	Nº de elementos	Força total [N]
Punção de 2,5mm	40,2	204	8200,8
Punção de 4mm	64,4	76	4894,4
Punção de 16mm	257,4	2	514,8
Lamina	2411,5	2	4823,0
Molas de recuperação	4858,2	4	19432,0
Molas da extracção	122,8	8	982,4
Total:			38847,4

Note-se que a máquina onde a ferramenta vai ser usada tem uma força de 60kN.

#### **4.2.1.7.Guiamento da ferramenta**

As ferramentas de corte por prensa são compostas geralmente por uma parte fixa e uma parte móvel. O guiamento da parte móvel em relação à parte fixa é feito por colunas guia e por casquilhos deslizantes na parte fixa e móvel respectivamente.

A Figura 33 e a Figura 34 mostram o aspecto dos casquilhos e das colunas seleccionadas.



**Figura 33 – Casquilho guia**



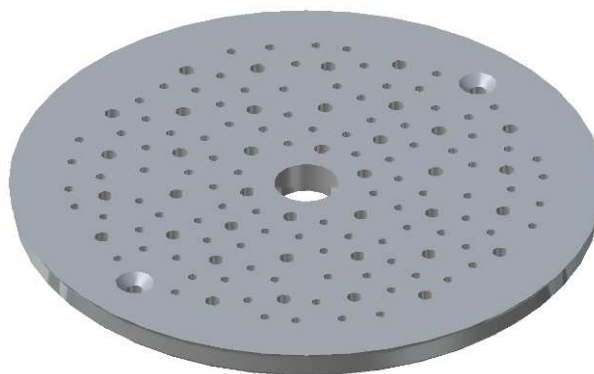
**Figura 34 – Coluna guia**

Para o correcto funcionamento das guias, neste caso concreto é importante que os casquilhos sejam devidamente lubrificados por uma corrente de ar comprimido com óleo.

Este tipo de lubrificação surge com a necessidade de remover pequenas partículas de pó abrasivo que andam no ar e se depositam na ferramenta, comprometendo assim o alinhamento desta e o consequente tempo de vida útil.

### ***4.3.Projecto mecânico***

#### ***4.3.1.Matriz***



**Figura 35 – Matriz.**

De acordo com *Provenza* <sup>[117]</sup>, a espessura mínima da matriz é dada pela seguinte expressão:

$$h = \sqrt{\frac{0,75F_c L}{b\sigma_{adm}}} CS \quad (13)$$

Onde:

L – Distancia máxima entre punções;

F<sub>c</sub> – Força total de corte;

σ<sub>adm</sub> – Tensão admissível;

b – Diâmetro da matriz;

CS – Coeficiente de segurança;

Logo a espessura mínima da matriz é:

$$h = 4,5mm \quad (14)$$

No entanto devido às condições de projecto, a matriz necessita de uma altura mínima de 6mm para servir de encosto à contra lâmina conforme mostra na Figura 36.

#### **4.3.1.1.Folga**

A folga entre o punção e a matriz é um parâmetro técnico bastante importante no processo de corte. Este parâmetro controla a qualidade e o aspecto do produto a obter bem como a própria durabilidade das ferramentas. No caso de uma folga ser demasiado pequena ocorre um aumento do desgaste das ferramentas, já no caso desta ser exageradamente grande as peças obtidas normalmente têm mau acabamento.

M. Rossi <sup>[114]</sup> – Completo, A., Grácio J., Apontamentos de tecnologia mecânica II, Universidade de Aveiro.

[115]<sup>1</sup>, refere que a folga radial entre o punção e a matriz pode variar conforme os casos entre 5 a 13% da espessura da chapa a cortar.

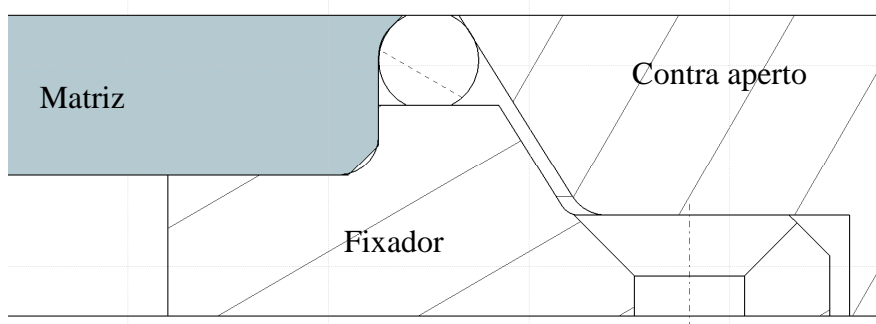
No entanto, de acordo com a experiência adquirida no projecto de ferramentas para o corte de lixas <sup>[6]</sup>, sabe-se que a folga total entre o punção e a matriz não deve ultrapassar os 0,05mm (5% da espessura da lixa) e o penetramento dos punções na matriz deverá ser de 5mm para que exista uma total separação do material cortado.



No entanto esta folga já está no limite máximo, uma vez que os fios de velcro a cortar têm uma espessura inferior à folga. No entanto para obter folgas inferiores a este valor é uma tarefa difícil e bastante dispendiosa. A opção passa por cortar parte do velcro por arrastamento, facto que não compromete a qualidade do produto acabado se as restantes folgas foram devidamente respeitadas e a matriz e os punções estiverem correctamente afiados.

Os punções são construídos em varão calibrado com tolerância h8, o que significa que os punções terão dimensão de  $2,5_0^{+0,014}$ .

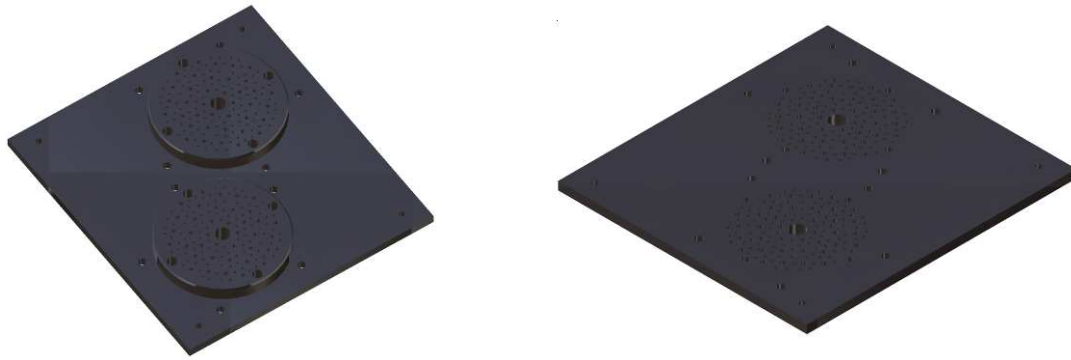
#### ***4.4.Montagem da matriz e almofada de corte***



**Figura 36 – Montagem do sistema de corte**

#### ***4.5.Placa porta punções***

A placa porta punções tem a forma mostrada na Figura 37. Assim facilmente se consegue substituir os punções mantendo o alinhamento dos mesmos com os respectivos furos da matriz. Na parte inferior da placa facilmente se monta a lâmina com um ajustamento cuidado.



**Figura 37 – Porta punções**

#### ***4.6.Punções***

Para os punções foi seleccionado metal duro com tamanho de grão de  $0,8\mu\text{m}$  e com um teor de 6% de cobalto, e para as cabeças aço MG50.

A escolha do metal duro com este grão surge baseada em testes anteriormente feitos em empresas que cortam este tipo de materiais. Já para as cabeças foi seleccionado o aço MG50, pois este é indicado para embutidura a frio, bem como para o uso em moldes de injeção.

A cabeça do punção é embutida a frio no punção. A Figura 38 mostra um punção.



**Figura 38 – Punção**

#### ***4.6.1. Dimensionamento à encurvadura dos punções***

No dimensionamento de um punção deve ser garantido que a tensão de trabalho seja bastante inferior à tensão de admissível de projecto, que geralmente é definida a partir da tensão limite de elasticidade do material do qual é construído. Este parâmetro deve ser afectado de um coeficiente de segurança que normalmente varia entre 1.5 e 2 <sup>[77]</sup>.

Quando as forças de corte actuam nos punções estas não devem ultrapassar certos limites, pois podem-se danificar os punções, a matriz ou até mesmo toda a ferramenta. Se o limite elástico dos punções for excedido, as paredes do punção tenderão a expandir-se em consequência da deformação plástica e o punção terá tendência a ficar preso na matriz ou levar mesmo à fractura.

Aplicando a fórmula de EULER <sup>[116]</sup> temos:

$$\sigma_f = \frac{\pi^2 EI}{L_0^2 A} \quad (15)$$

Onde:

$\sigma_f$  - Tensão de encurvadura;

E – Modulo de elasticidade;

$L_0$  – Comprimento de encurvadura;

I – Momento de inércia da secção;

Sabendo que para um punção com a forma cilíndrica o momento de inércia é dado por:

$$I = \frac{\pi D^4}{4} \quad (16)$$

Trabalhando a expressão fica:

$$L_0 = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{F_c}} \quad (17)$$

Então, para o punção de diâmetro 2,5mm que é o mais crítico temos:

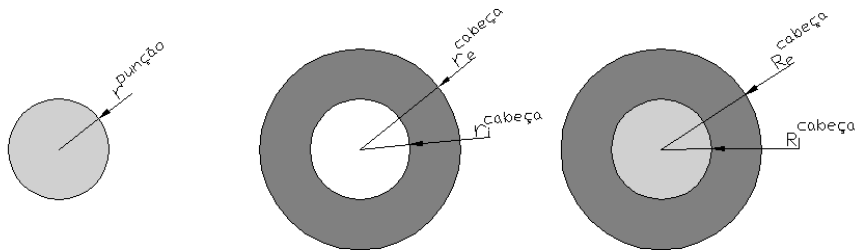
$$L_0 = 49mm \quad (18)$$

As condições de projecto mostram que o ideal é o punção ter 48mm de comprimento. No entanto, apenas 15mm do punção não tem guiamento. Assim, o comprimento não guiado do punção está bastante afastado do que será o comprimento máximo admissível do punção.

#### 4.6.2. Aperto

Como já referido anteriormente, o corpo dos punções é embutido na respectiva cabeça com um determinado aperto. Para garantir que o aperto aguenta a força aplicada sem existir escorregamento, bem como dano das cabeças durante a embutidura, é necessário dimensionar correctamente a interferência.

Como mostra a Figura 39, seja  $r^{\text{punção}}$  o raio do punção, e  $r_i^{\text{cabeça}}$  e  $r_e^{\text{cabeça}}$  o raio interior e exterior da cabeça do punção respectivamente antes da montagem e  $R^{\text{punção}}$  o raio final do punção, e  $R_i^{\text{cabeça}}$  e  $R_e^{\text{cabeça}}$  após a montagem.



**Figura 39 – Esboço do punção e da respectiva cabeça antes e depois da montagem**

Considerando que o eixo da cabeça do punção e o punção serão montados concêntricos e acoplados, como se pretende através de um ajuste com interferência, os ajustes de compatibilidade geométrica podem ser escritos como:

$$\left| R_e^{\text{cabeça}} - r_i^{\text{cabeça}} \right| + \left| r^{\text{punção}} - R_e^{\text{cabeça}} \right| = \frac{\Delta}{2} \quad (19)$$

Onde  $\Delta$  é a interferência diametral.

Sejam as tensões normais e tangenciais distribuídas conforme mostra a Figura 40.

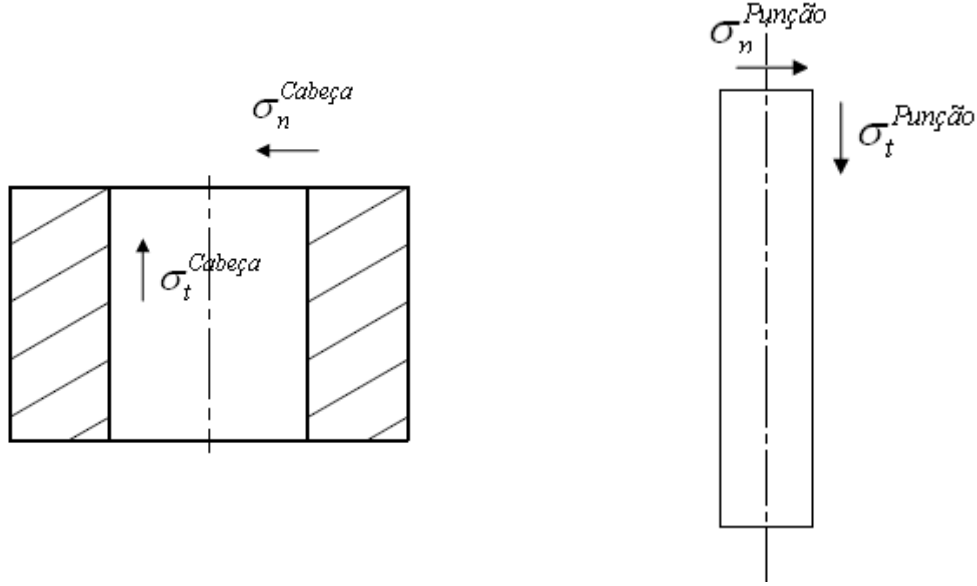


Figura 40 – Diagramas de forças na cabeça e no punção respectivamente.

As deformações tangenciais na cabeça do punção e no eixo do punção podem ser expressas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} |\varepsilon_t^{cabeça}| &= \left| \frac{2\pi R_e^{cabeça} - 2\pi r_i^{cabeça}}{2\pi r_i^{cabeça}} \right| = \left| \frac{R_e^{cabeça} - r_i^{cabeça}}{r_i^{cabeça}} \right| \\ |\varepsilon_t^{punção}| &= \left| \frac{2\pi r^{punção} - 2\pi R_e^{cabeça}}{2\pi r^{punção}} \right| = \left| \frac{r^{punção} - R_e^{cabeça}}{r^{punção}} \right| \end{aligned} \quad (20)$$

Sabendo que a lei de *Hooke* é válida para o punção e para a cabeça no diâmetro comum temos:

$$\begin{aligned} |\varepsilon_t^{cabeça}| &= \frac{1}{E^{Cabeça}} \left[ \sigma_t^{Cabeça} - \nu^{Cabeça} (\sigma_n^{Cabeça} + \sigma_l^{Cabeça}) \right] \\ |\varepsilon_t^{punção}| &= \frac{1}{E^{punção}} \left[ \sigma_t^{punção} - \nu^{punção} (\sigma_n^{punção} + \sigma_l^{punção}) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

Por equilíbrio no raio comum (após montagem) vem:

$$\begin{aligned}\sigma_n^{Cabeça} &= \sigma_n^{punção} \\ \sigma_l^{Cabeça} &= \sigma_l^{punção} = 0\end{aligned}\quad (22)$$

No entanto, sabendo que para o caso da cabeça a tensão tangencial e normal  $\sigma_t$  e  $\sigma_n$  respectivamente ocorre no raio interior temos:

$$\begin{aligned}\sigma_t^{Cabeça} \big|_{interface} &= p \left( \frac{\left(r_e^{cabeça}\right)^2 + \left(r_i^{cabeça}\right)^2}{\left(r_e^{cabeça}\right)^2 - \left(r_i^{cabeça}\right)^2} \right) \\ \sigma_n^{Cabeça} \big|_{interface} &= -p\end{aligned}\quad (23)$$

Onde  $p$  é a pressão na interface resultante da montagem da cabeça no punção. De forma análoga para o punção temos:

$$\begin{aligned}\sigma_t^{punção} \big|_{interface} &= -p \left( \frac{\left(r^{punção}\right)^2 + 0}{\left(r^{punção}\right)^2 - 0} \right) = -p \\ \sigma_n^{punção} \big|_{interface} &= -p\end{aligned}\quad (24)$$

Combinando as equações (20) na equação (19) fica:

$$\left| \epsilon_t^{cabeça} r_i^{cabeça} \right| + \left| \epsilon_t^{punção} r^{punção} \right| = \frac{\Delta}{2}\quad (25)$$

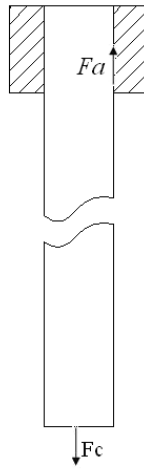
Substituindo as equações (23) e (24) nas equações (21) vem:

$$\left| \frac{r_i^{cabeça}}{E^{cabeça}} \left[ p \left( \frac{\left(r_e^{cabeça}\right)^2 + \left(r_i^{cabeça}\right)^2}{\left(r_e^{cabeça}\right)^2 - \left(r_i^{cabeça}\right)^2} \right) - (-p) v^{cabeça} \right] \right| + \left| \frac{r^{punção}}{E^{punção}} \left[ -p - (-p) v^{punção} \right] \right| = \frac{\Delta}{2}\quad (26)$$

Simplificando:

$$p \left( \left| \frac{r_i^{cabeça}}{E^{cabeça}} \left[ \frac{(r_e^{cabeça})^2 + (r_i^{cabeça})^2}{(r_e^{cabeça})^2 - (r_i^{cabeça})^2} + \nu^{cabeça} \right] \right| + \left| \frac{r^{punção}}{E^{punção}} [-1 - \nu^{punção}] \right| \right) = \frac{\Delta}{2} \quad (27)$$

Da análise da Figura 41 facilmente se percebe que a pressão na interface esta directamente relacionada com a força de corte através do atrito entre a cabeça e o respectivo punção.



**Figura 41 – Distribuição de forças no punção durante o corte**

Como durante o corte a cabeça e o punção deverão estar em equilíbrio entre si, temos:

$$Fc = Fa = \mu RN \quad (28)$$

Onde o coeficiente de atrito,  $\mu$ , assume o valor de 0,20 para os dois materiais em causa e  $RN$  é a força exercida pela cabeça no punção.

Sabendo que a pressão na interface é dada por:

$$p = \frac{RN}{Area} \quad (29)$$

Substituindo na equação ( 28):

$$p = \frac{Fc}{\mu 2\pi R_i^{cabeça} h}$$

ou

$$p = \frac{Fc}{\mu 2\pi R^{punção} h} \quad (30)$$

Onde h é a altura da cabeça do punção.

Como num ajuste por interferência a diferença de raios antes e depois da embutidura é muito pequena, por uma questão de cálculo podemos simplificar dizendo que:

$$R_i^{cabeça} = r_i^{cabeça}$$

$$R^{punção} = r^{punção} \quad (31)$$

Substituindo a equação (30) em (27) fica:

$$\Delta = \frac{Fc}{\mu \pi r^{punção} h} \left( \left| \frac{r_i^{cabeça}}{E^{cabeça}} \left[ \left( \frac{(r_e^{cabeça})^2 + (r_i^{cabeça})^2}{(r_e^{cabeça})^2 - (r_i^{cabeça})^2} \right) + v^{cabeça} \right] + \left| \frac{r^{punção}}{E^{punção}} [-1 - v^{punção}] \right| \right| \right) \quad (32)$$

Aplicando a equação (32), facilmente se consegue calcular a interferência mínima para que não haja escorregamento. No entanto, a dimensão máxima pode ser calculada através das equações (20) e (21), a partir das quais podemos determinar o diâmetro máximo do interior da cabeça, de modo a manter a integridade deste componente.

Assim, combinando as equações e assumindo apenas deformação radial fica:

$$\left| \frac{R_i^{cabeça} - r_i^{cabeça}}{r_i^{cabeça}} \right| = \frac{1}{E^{cabeça}} v^{cabeça} \sigma^{cabeça} \quad (33)$$

Onde  $\sigma^{cabeça}$  é a tensão de ruptura do material em causa.

Resolvendo a equação para determinar o raio máximo da cabeça fica:

$$R_i^{cabeça} = \frac{r_i^{cabeça}}{E^{cabeça}} v^{cabeça} \sigma^{cabeça} + r_i^{cabeça} \quad (34)$$



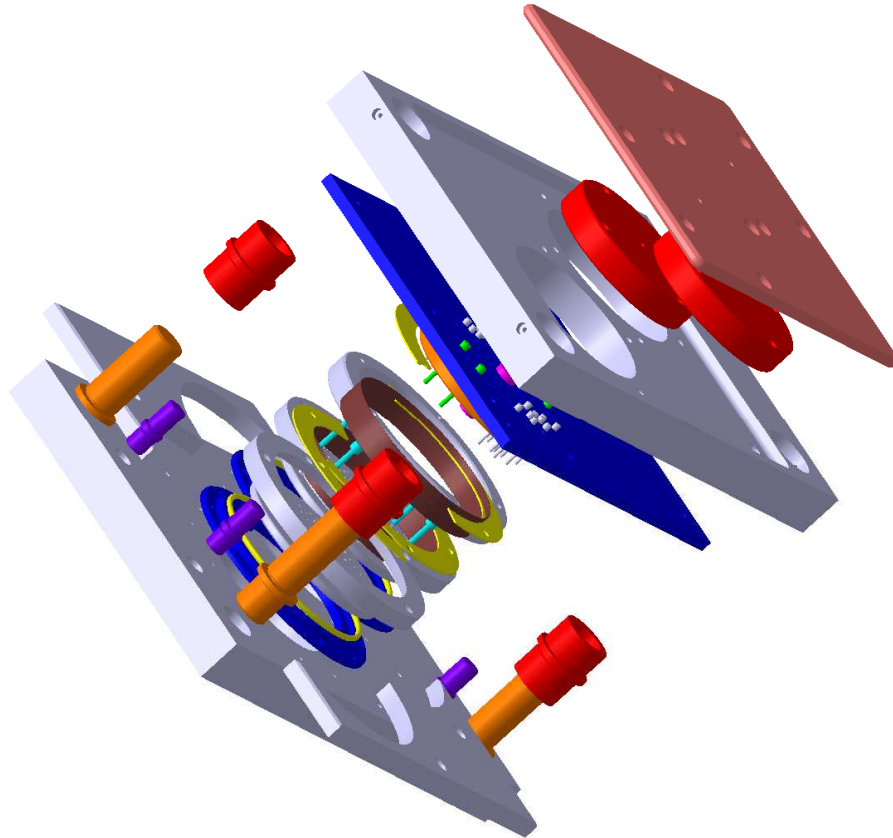
A Tabela 12 apresenta um resumo das dimensões dos punções e das respectivas cabeças.

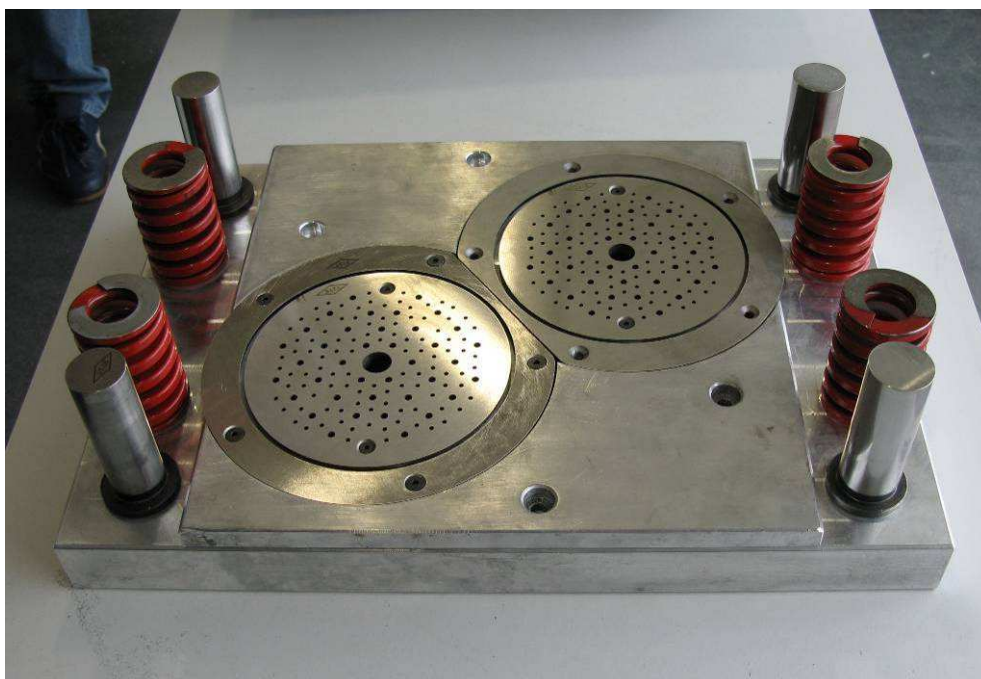
**Tabela 12 – Resumo das dimensões nominais dos punções e respectivas cabeças.**

Conjunto	Diâmetro do punção [mm]	Interferência mínima $\Delta$ [mm]	Diâmetro mínimo da cabeça [mm]	Diâmetro máximo da cabeça [mm]
2,5	2,5	0,005	2,495	2,4
4	4	0,007	3,993	3,92
16	16	0,035	15,965	15,95

Por razões construtivas, foi mantida a dimensão do punção alterada a cota nominal da cabeça do punção, uma vez que o punção é fornecido em varão calibrado.

#### ***4.7. Imagens da ferramenta após construção***





**Figura 42 – Ferramenta após construção**

## **Capítulo V**

*Neste capítulo são feitas as conclusões gerais do trabalho desenvolvido e apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.*

### **5.1. Conclusões gerais**

O presente trabalho foi dedicado à otimização do processo de corte de telas abrasivas. Para o efeito desenvolveu-se uma ferramenta de corte multi-furo e um revestimento por filmes de diamante.

A nova ferramenta foi construída para produção em série, e a avaliação do seu desempenho em condições reais de trabalho permitiu aumentar significativamente a rentabilidade do produto acabado.

O revestimento de matrizes de corte com filmes de diamante seguindo as condições operatórias permitiu triplicar o tempo de vida de cada ferramenta.

As condições experimentais estabelecidas são perfeitamente reproduzíveis no mesmo tipo de substrato, permitindo a sua aplicação em áreas afins

### **5.2. Trabalhos futuros**

O trabalho realizado no âmbito desta tese deverá ainda ser alvo dos seguintes desenvolvimentos:

- ❖ Estudo do comportamento de filmes de diamante onde o substrato tenha sido tratado por via térmica e por via química;
- ❖ Estudo do desempenho de filmes em nano-diamante;
- ❖ Desenvolvimento e estudo do comportamento em filmes de diamante depositados em camadas do tipo nano – micro – nano;
- ❖ Estudo do desempenho de filmes de diamante obtidos por via física, PVD.

- ❖ Estudo da viabilidade económica do uso de revestimentos;

### ***Referências e Bibliográfica***

- [1] – S. Matsumoto, Y. Sato, M. Kamo and N. Setaka, Jpn. J. Appl. Phys., 21 (1982) 183.
- [2] – Robert F. Davis, Diamond films and coatings. Development, properties, and applications, (1992), 22-24.
- [3] – Ramamurti, R. Jayaseelan, V., Low surface temperature synthesis and characterization of diamond thin films, diamond and relat. Mater. 15(2005) 1336-1349.
- [4] – <http://www.vegabrasivos.ind.br> Vega abrasivos, acedido em 26/03/2008.
- [5] – <http://www.indasa.pt> INDASA industria de abrasivos, S.A., acedido em 01/04/2008.
- [6] – Citado por
- [7] – Karl schroter. US Patent N° 154915 (Entregue 31 de Outubro de 1923, patenteada a 11 de Agosto de 1925)
- [8] – P. Schwartkopf, deutsche Edelstahlwerke. AG German patent 720502 (patented 1929, issued 1942).
- [9] – “Powder metallurgy”, ASM Handbook, Vol 7, 76.
- [10] – G. Cabral, Development and application of Diamond coatings onto cutting tools to machine EDM electrodes for mould industry, (2006) 2.
- [11] – Cabral, Gil, Estudo e caracterização das propriedades eléctricas, magnéticas e mecânicas do metal duro. Projecto de fim de curso, DECV – Universidade de Aveiro (1997).
- [12] – G. Cabral, Development and application of Diamond coatings onto cutting tools to machine EDM electrodes for mould industry, (2006) 1.
- [13] – “Powder metallurgy”, ASM Handbook, Vol 7, 800.
- [14] – “World Directory and Handbok of harmetals and Hard Materials”, Kenneth J. A. Brookes, international Carbide Data, Sixth Edition (1996).
- [15] – V. Neto, Investigation on the film properties of advanced diamond coatings deposited using time-modulated CVD, (2004) 3.

- [16] – Robert F. Davis, Diamond films and coatings. Development, properties, and applications, (1992), 6-15.
- [17] – K. Bewilogua, M. Keuneche, K. Weigel and E. Wiemann, Thin Solid Films, 469-470 (2004) 86.
- [18] – Chowdhury, S., Barra, E., Laugier, M. T., Study of mechanical properties of CVD diamond on sic substrates, diamond and relat. mater, 13 (2003) 1625-1631.
- [19] – Ramamurti, R. Jayaseelan, V., Low surface temperature synthesis and characterization od diamond thin films, diamond and relat. Mater. 15(2005) 1336-1349.
- [20] – Yooshikawa, M., Murakawa, M. and A. Feldman, applications of diamond films and related materials, Esevier, Amsterdam, 1991.
- [21] – Inspector, A; Bauer, C. E.; oles E.J. surf. Coat. technol. 1994, 68/69, 359-368.
- [22] – Inspector, A; Bauer, C. E.; oles E.J. Diamond-coated WC-Co cutting tools. 1998, 38, 85-91.
- [23] – Saito, Y.; Isozaki, T.; Fukumoto, A.; Chosa, M.; Ito, T.; Bauer, E.; Inspektor, A.; oles, E.J. Diamond relat. Mater. 1993, 2, 1391.
- [24] – Lux, B.; Haubner, R. int. j. refractory metals and Hard materials 1989, 8, 158.
- [25] – Murakawa, M.; Takeuchi, S.; Miyazawa, H; Hirose, Y. Surf coat. Techonol. 1988, 36, 303.
- [26] – Pollini, R., Bravi, F., Casadei, F., Effect of grain size and surface treatments on the cutting properties of Diamond coated Co-cemented tungsten carbide tools, Diamond and related materials (2002) 726-730.
- [27] – Li, Y. S., Tang, Y., Yang, Q., Al-enhanced nucleation and adhesion of diamond films on WC-Co substrates, Refractory metals & hard materials, (2007)
- [28] – Cappelli, E. Pinzari, F, Diamond growth on different cutting tool materials: influence of substrate pre-treatments, Diamond and relat. Mater (1996), 292 - 298.
- [29] – Anastassakis, E., Siakavellas, M., Elastic properties of textured diamond and silicon, Journal of applied physics, 90 (2001) 144-152
- [30] – Clyne, T. W., Residual stresses in thick and thin surface coatings, Encyclopedia of materials: science and technology, (2001) 1-18.
- [31] – S. Matsumoto, Y. Sato, M. Kamo and N. Setaka, Jpn. J. Appl. Phys., 21 (1982) 183.

- [32] – Huimin Liu, David S. Dandy, Diamond chemical vapour deposition, Nucleation and early growth stages, (1995), 27.
- [33] – R. Haubner, B. Lux, Diamond and Related Materials, 2 (1993) 1277.
- [34] – S. Matsumoto and Y. Matsui, J. Mat. Sci., 18 (1983) 1785.
- [35] – D. G. Goodwin, J. Appl. Phys., 74 (1993) 6888.
- [36] – L. Schäfer, C. P. Klages, Appl. Phys. Lett., 58 (1991) 571.
- [37] – K. Tankala and T. DebRoy, J. Appl. Phys., 72 (1992) 712.
- [38] – J. C. Angus, H. A. Will and W. S. Stanko, J. Application Phys., 39 (1968) 2915.
- [39] – “Powder metallurgy”, ASM Handbook, Vol 7, () 773.
- [40] – “Powder metallurgy”, ASM Handbook, Vol 7, () 775.
- [41] – S. Nath and J. I. B Wilson, Diamond and related Materials, 5 (1996) 65.
- [42] – Hugh O. pierson, Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes, properties, processing and applications, (1993) 272.
- [43] – Mark A. Prelas, Galina Popovici and Louis K. Bigelow, “Handbook of industrial diamonds and diamond films”, Marcel Dekker, Inc, 1998.
- [44] – Y.S. Li, Y. tang, Q. Yang, S. Shimada, R. Wei, K.Y. Lee, A. Hirose, international journal of refractory metals & Hard Materials, (2007), 1.
- [45] – Robert F. Davis, Diamond films and coatings. Development, properties, and applications, (1992), 22-24.
- [46] – F. Szuets, M. Werner, R. S. Sussmann, C. S. J. Picklesand H. J. Fecht, J. Appl. Phys., Vol. 86, No. 11 (1999) 6010-6017.
- [47] – Hay, R. cutting Tool Engineering 1993, 45, 52.
- [48] – T. DebRoy, K. Tankala, W. A. Yarbrough and M. Messeir, J. Appl. Phys., 68 (1990) 24.
- [49] – R. Gat, J. C. Angus, J. C. Angus, J. Appl. Phys, 74 (1993) 5981.
- [50] – K. Tankala and T. DebRoy, Surf. Coating Technology, 62 (1993) 349.
- [51] – Santos, José, Projecto e desenvolvimento de um reactor HFCVD para revestimentos a base de carbono, (2007) 15.

- [52] – Y. A. Mankelevich, A. T. Rakhimov and N. V. Suetin, *Diamond Relat. Mater.*, 5 (1993) 888.
- [53] – Y. A. Mankelevich, A. T. Rakhimov and N. V. Suetin, *Diamond Relat. Mater.*, 5 (1993) 888.
- [54] - <http://www.wag.caltech.edu/foresight/papers/Cagin/Caginpap.html>, Wear and friction and mems: Experiments and simulation, consultado em 22 de Fevereiro de 2008.
- [55] – Word directory and handbook of hardmetals and hard materials, Kenneth J. A. Brookes. International carbide data (1996).
- [56] – J. J. Shermer, J. E. M. hogenkamp, G. C. j. otter, G. jansen, W. J. P. van Enckvort e L. J. Gilling, *Diamond relat. Mater.*, 2(1993)1149.
- [57] – G. Cabral, Development and application of Diamond coatings onto cutting tools to machine EDM electrodes for mould industry, (2006) 57.
- [58] – Dandy, S. D., Coltrin, M. E., *Diamond handbook*, 4 (1993), 23.
- [59] – M. Frenklach, R. Kematick, D. Huang, W. Howard, K. E. Spear, A. W. Phelps and R. Koba, *J. Appl. Phys.*, 66: 395 (1989).
- [60] – M. Frenklach, W. Howard, D. Huang, J. Yuan, K. E. Spear and R. Koba, *J. appl. Phys. Lett.*, 59: 546 (1991).
- [61] – W. Howard, D. Huang, J. Yuan, M. Frenklach, K. E. Spear, R. Koba and A. W. Phelps, *J. Appl. Phys.*, 68: 1247 (1990).
- [62] – S. Mitura, *J. Cryst. Growth*, 80: 417 (1987).
- [63] – M. C. McMaster, W. L. Hsu, D. S. Dandly, M. E. Coltrin, *Application Phys.* 76 (1994) 7567.
- [64] – W.A. Yarbrough and R. Messier, *Science*, 247 (1990) 688.
- [65] – W.A. Yarbrough, *J. Am. Ceram. Soc.*, 77 (1992) 3179.
- [66] – S. Schwarz, S. M. Rosiwal, M. Frank, D. Breidt, R. F. Singer, *Diamond Relat. Mater.*, 11 (2002) 589.
- [67] – R. Haubner, B. Lux, *Diamond and Related Materials*, 2 (1993) 1277.
- [68] – R. Bruneteiner, R. Haubner, B. Lux, *Diamond and Related Materials*, 2 (1993) 1263.
- [69] – Y. Z. Wan, D. W. Zhang, Z. J. Liu, J. T. Wang, *Appl. Phys. A*, 67 (1998) 225.



- [70] – S. T. Lee, Y. W. Lam, Z. Lin, Y. Chan, Q. Chen, Phys. Rev. B, 55 (1997) 15937.
- [71] – J. A. Smith, M. A. Cook, S. R. Langford, S. A. Redman, M. N. R. Ashfold, Thin Solid Films, 368 (2000) 169.
- [72] – S. Schwarz, S. M. Rosiwal, M. Frank, D. Breidt, R. F. Singer, Diamond and Related Materials, 11 (2002) 589.
- [73] – Santos, José, Projecto e desenvolvimento de um reactor HFCVD para revestimentos a base de carbono, (2007) 15.
- [74] – Y. Baik, K. Y. Eun, Surf. Coat. Technol., 47 (1991) 545.
- [75] – Duarte, J., Rocha, A., Santos, A., Tecnologia Mecânica – Corte em ferramenta, INEGI, Volume 1, (2003).
- [76] – [Http://www.nortonabrasives.com](http://www.nortonabrasives.com) Saint-Gobain Abrasives, acedido em 20/03/2008.
- [77] – Rodrigues, J., Martins, P. Tecnologia da deformação plástica, Escolar editora (2005).
- [78] – Robert F. Davis, Diamond films and coatings. Development, properties, and applications, (1992), 270-310.
- [79] – <http://www.purdue.edu/REM/rs/sem.htm> Purdue University, acedido em 22/04/2008.
- [80] – P. V. houn, Materials Science and engineering, B11(1992) 235.
- [81] – R. E. Shroder, J. Nemanich e J. T. Glass, Phys. Rev. B, 41(1990) 3783.
- [82] – A. Hoffman, A. Fayer, A. Laikhtman, e R. Brenner, J. appl. Phys., 77, (1995) 3126.
- [83] – P. K. Bachmann e D.U. Wiecher, Diamond and related materials, 1 (1992) 512.
- [84] – R. B. Jackman, J. Beckman e J. S. Foord, Diamond and relat. Mater., 4 (1995) 735.
- [85] – S. R. Sails, D. J. Gardiner, M. Bowden, J. Savage e D. Rodway, (1995).
- [86] – kim, J. G.; yu, J. Scripta Materials, v. 39. p. 807, 998.
- [87] – Boppart, H.; Straaten, J; Silvera, I.F. Phys. Rev. B., v.32, p 1423, 1985.
- [88] – W. Zhu, C. A. Randall, A. R. Badzian e R. Messier, J. Vac. Sci. Technol. A, 7 (1989) 2315.
- [89] – R. J. Nemanich, J. T. Glass, G. Lucovsky e R. E. Shrofer. J. Vac. Sci. Technol. A. 6 (1988) 1783.

- [90] – L. Fayette, B. Marcus, M. Mermoux, L. Abello e G. Lucazeau, *Diamond and relat. Mater.*, 3 (1994) 438.
- [91] – M. Yoshikawa, G. Katairi, H. Ishitani, M. Ono e K. Mattsumura, *App. Phys lett.*, 55 (1989) 2608.
- [92] – C. D. Clark e C. B Dickerson, *J. Phys. D*, 4 (1992) 862.
- [93] – Rointan F. Bunshah, *Handbook of hard coatings, deposition technologies, properties and applications*, (2001), 204.
- [94] – G. R. Anstis, P. Chantikul B. R Lawn, and D.B. Marchall, *J. Am. Ceram. Soc.* 64, 553 (1981).
- [95] – C.B. Ponton and R. D. Rawlings, *Mater. Sci. Technol.* 5 865 (1989).
- [96] – Pulker, K. H., and Berger R., *Surf. Technol.*, 14:25 (1981).
- [97] – Rointan F. Bunshah, *Handbook of hard coatings, deposition technologies, properties and applications*, (2001), 195.
- [98] – Heavens, O. S., *J. Physics Radium*, 11:355(1950).
- [99] – Jindal, P.C., Quinto, D. T., and Wolf, G. J., *Thin solid films*, (1984) 154-361.
- [100] – ASTM Satandard Test Method for plane-strain Fracture Toughness, *Annual book of ASTM Standards* (American society for testing and materials, Philadelphia, PA, 1983) Vol. 3.01, Sec .3.
- [101] – Li, Y. S., Tang, Y., Yang, Q., Al-enhanced nucleation and adhesion of diamond films on WC-Co substrates, *Refractory metals & hard materials*, (2007)
- [102] – R. Polini, F. Le Normand, G. Marcheselli, E. Traversa, *J. Am. Ceram. Soc.*, 82 (1999), 1429.
- [103] – “Fundamentals of grinding-surface conditions of ground surfaces”, Hans Hegeman .Phd Thesis, University press-Groningen (2000).
- [104] – Jindal, P. C.; Quinto, D. T.; Wolfe, G. J. *Thin solid Films* 1987, 54, 36.
- [105] – Riccardo Polini, “nanoSMAT2005”, (2005) i-22.
- [106] – M. G. Peter, R. H. Cummings, *European Patent* 0519587 A1 (1992).
- [107] – G. Cabral, *Development and application of Diamond coatings onto cutting tools to machine EDM electrodes for mould industry*, (2006) 101-107.
- [108] – Pollini, R., Bravi, F., Casadei, F., *Effect of grain size and surface treatments on the cutting properties of Diamond coated Co-cemented tungsten carbide tools*, *Diamond and related materials* (2002) 726-730.

- [109] – Mendes de Barros, R. C., Dispersion liquid properties for seeding in CVD Diamond nucleation enhancement, Diamond and related materials (1996).
- [110] – Cabral, G. Madaleno, J. C., Diamond chemical vapour deposition on seeded cemented tungsten carbide substrate, Thin solid films (2006)158-163.
- [111] – Barros, R. C., Corat, E J., Ferreira, N.G., Dispersion liquid properties for efficient seeding in CVD Diamond nucleation enhancement, Diamond and relat. Mater (1993), 1323-1332.
- [112] – Cabral, Gil, Madaleno, J. C., E. Titus, J. Grácio, Diamond vapour deposition on seeded cemented tungsten carbide substrates, Diamond and relt. Mater (2006), 158-163.
- [113] – K. Byrappa, T. Ohachi, Crystal growth technology, (2003), 25.
- [114] – Completo, A., Grácio J., Apontamentos de tecnologia mecânica II, Universidade de Aveiro.
- [115] – Rossi, M. Estampado en frio de la chapa, Hoepli, Editorial científico médica, 8thed., Barcelona, 1996.
- [116] – Timoshenko, S., Resistência dos materiais, ed 1969, Ao livro técnico, Rio de Janeiro, Brasil.
- [117] – Provenza, F. EstamposI, ed 1983, Pro-tec, São Paulo, Brasil.